



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**LEYLA RODRIGUES PESSOA**

**INFLUÊNCIA DO VOLUME DE PASTA, BAIXO TEOR DE CIMENTO E  
COMPRIMENTO DA FIBRA DE POLIPROPILENO NA RETRAÇÃO PLÁSTICA E  
NA RESISTÊNCIA VERDE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS IMPRESSOS EM 3D**

**JOÃO PESSOA  
2026**

**LEYLA RODRIGUES PESSOA**

**INFLUÊNCIA DO VOLUME DE PASTA, BAIXO TEOR DE CIMENTO E  
COMPRIMENTO DA FIBRA DE POLIPROPILENO NA RETRAÇÃO PLÁSTICA E  
NA RESISTÊNCIA VERDE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS IMPRESSOS EM 3D**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Alyssandro  
Soares dos Anjos

**JOÃO PESSOA  
2026**

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

P475i Pessoa, Leyla Rodrigues.

Influência do volume de pasta, baixo teor de cimento e comprimento da fibra de polipropileno na retração plástica e na resistência verde de materiais cimentícios impressos em 3D / Leyla Rodrigues Pessoa. - João Pessoa, 2026.

58 f. : il.

Orientação: Marcos Alyssandro Soares dos Anjos.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Impressão 3D em concreto. 2. Taxa de evaporação.  
3. Deformações no estado fresco. 4. Materiais cimentícios suplementares. 5. Fibras de polipropileno.  
I. Anjos, Marcos Alyssandro Soares dos. II. Título.

UFPB/BC


CDU 624.01(043)

**INFLUÊNCIA DO VOLUME DA PASTA, BAIXO TEOR DE CIMENTO E  
COMPRIMENTO DA FIBRA DE POLIPROPILENO NA RETRAÇÃO  
PLÁSTICA E NA RESISTÊNCIA VERDE DE MATERIAIS CIMENTÍCIOS  
IMPRESSOS EM 3D**


**LEYLA RODRIGUES PESSOA**

**Dissertação aprovada em 24 de fevereiro de 2026**


**Período Letivo: 2025.2**

Documento assinado digitalmente  
 **MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS**  
Data: 26/02/2026 13:45:26-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Marcos Alyssandro Soares dos Anjos – IFPB  
Orientador**

Documento assinado digitalmente  
 **ALINE FIGUEIREDO DA NOBREGA**  
Data: 26/02/2026 13:54:13-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Profa. Dra. Aline Figueirêdo Da Nóbrega – UFCG  
Examinadora Interna**

Documento assinado digitalmente  
 **ARNALDO MANOEL PEREIRA CARNEIRO**  
Data: 28/02/2026 11:13:55-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Prof. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro – UFPE  
Examinador Externo**

**João Pessoa/PB  
2026**

## AGRADECIMENTOS

Ao Deus pai, por ter segurado minha mão, por me conceder sabedoria, por abrir portas e me mostrar que tudo é possível. Foi um momento de muito crescimento e aprendizado. Agradeço toda a força que Ele me proporcionou em momentos difíceis.

Agradeço a minha família por todo apoio e por sempre acreditarem em mim. Ao meu querido Heitor, por ter sido meu maior suporte e por ter dedicado tanto seu tempo e sua ajuda na minha pesquisa, seus conhecimentos foram essenciais no desenvolvimento dos ensaios. Agradeço-o por ter abdicado de tantos finais de semana para que eu pudesse finalizar as minhas atividades antes do meu intercâmbio, por ter acreditado em mim antes mesmo que eu acreditasse, sou eternamente grata por tudo.

Agradeço ao meu professor orientador, Dr. Marcos Alyssandro, pelas orientações, pela confiança ao me permitir iniciar um novo ensaio no laboratório de pesquisa, pela disponibilidade e por todo o apoio e paciência ao longo deste percurso.

À professora Dra. Aline Figueirêdo da Nóbrega e ao professor Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro pelas valiosas contribuições, questionamentos e participação neste processo, que enriqueceram o trabalho.

Ao IFPB, UFPB e TU/Eindhoven por disponibilizarem seus laboratórios para o desenvolvimento da pesquisa.

Agradeço a professora Sandra Lucas pela parceria desenvolvida, mas em especial pela acolhida tão generosa e pelas orientações fundamentais.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPB, por contribuir com meu crescimento acadêmico e profissional.

A todos os meus colegas de pesquisa e a todos os bolsistas que tornaram tudo isso possível, sou eternamente grata pela parceria e pelo apoio. Agradeço imensamente por toda a ajuda disponibilizada ao longo dessa trajetória.

Agradeço à Ana Mayara, por ter gentilmente disponibilizado seus equipamentos, e ao Emerson, por ter contribuído para a melhoria do ensaio de retração plástica.

Aos meus amigos que me apoiam e estão ao meu lado.

Obrigada a todos que fizeram parte desta jornada!

*“Want het groote geschiedt niet bij impulsie alleen en is een aaneenschakeling van kleine dingen die tot elkaar gebragt zijn.”*

*“Porque as grandes coisas não acontecem apenas por impulso, mas sim como uma sucessão de pequenas coisas que são reunidas.”<sup>1</sup>*

*— Vincent van Gogh, Carta 274 (Haia, 22 out. 1882)*

---

<sup>1</sup> VAN GOGH, Vincent. Letter 274. The Hague, 22 Oct. 1882. In: *Vincent van Gogh: The Letters*. Edited by Leo Jansen; Hans Luijten; Nienke Bakker. London: Thames & Hudson, 2009. Tradução nossa.

## RESUMO

A automação na construção civil, especialmente por meio da impressão 3D, surge como uma solução promissora para aumentar a produtividade, permitindo a fabricação de estruturas tridimensionais diretamente a partir de modelos digitais. No entanto, o concreto impresso em 3D está sujeito à rápida evaporação da água dos poros imediatamente após a extrusão, o que favorece a ocorrência de retração plástica e a formação de fissuras, podendo comprometer a durabilidade, a funcionalidade, a estética e a estabilidade estrutural dos elementos produzidos. Neste estudo, utilizou-se um método experimental para determinar a resistência verde e as deformações por retração plástica em misturas cimentícias impressas em 3D. O estudo avaliou os efeitos da substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares, como filler calcário e metacaulim, variando o volume da pasta pelo aumento do teor de agregados e incorporando fibras de polipropileno. Os resultados indicaram que a redução do teor de cimento e do volume da pasta contribuiu para a diminuição da retração plástica. Além disso, a incorporação de fibras de polipropileno mostrou-se altamente eficaz no controle da retração plástica e no aumento da resistência verde, mesmo sob condições de maior taxa de evaporação de água, ao promover restrição mecânica e redistribuição de tensões no estado fresco.

**Palavras-chave:** Impressão 3D em concreto; taxa de evaporação; deformações no estado fresco; materiais cimentícios suplementares; fibras de polipropileno.

## ABSTRACT

Automation in civil construction, especially through 3D printing, emerges as a promising solution for increasing productivity, enabling the manufacture of three-dimensional structures directly from digital models. However, 3D-printed concrete is subject to rapid evaporation of water from the pores immediately after extrusion, which favors the occurrence of plastic shrinkage and the formation of cracks, which can compromise the durability, functionality, aesthetics, and structural stability of the elements produced. In this study, an experimental method was used to determine the green strength and plastic shrinkage deformations in 3D-printed cementitious mixtures. The study evaluated the effects of partially replacing cement with supplementary cementitious materials, such as limestone filler and metakaolin, varying the paste volume by increasing the aggregate content, and incorporating polypropylene fibers. The results indicated that reducing the cement content and paste volume contributed to decreasing plastic shrinkage. Furthermore, the incorporation of polypropylene fibers proved highly effective in controlling plastic shrinkage and increasing green strength, even under conditions of higher water evaporation rates, by promoting mechanical restraint and stress redistribution in the fresh state.

**Key-words:** 3D concrete printing; evaporation rate; early-age deformations; supplementary cementitious materials; polypropylene fibers.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ponte de concreto impressa em 3D: (a) em Gemert, (b) em Nijmegen, nos Países Baixos. ....	19
Figura 2 – A primeira casa impressa em 3D do Projeto Milestone (Foto de Bart van Overbeeke) e sua planta baixa.....	19
Figura 3 – Exemplos de aplicação de 3DCP .....	20
Figura 4 – Fissuras relacionadas à retração presentes em a) um edifício residencial de dois andares impresso, b) a primeira estrutura 3DPC na Europa e c) as paredes externas e internas de um edifício residencial construído na Holanda.....	21
Figura 5 – Caracterização física dos materiais .....	32
Figura 6 – Fluxograma do programa experimental .....	34
Figura 7 – Calorímetro .....	34
Figura 8 – Teste de resistência à compressão verde .....	35
Figura 9 – Diagrama do setup da câmara climatizada.....	37
Figura 10 – Amostra impressa dentro da câmara climatizada.....	37
Figura 11 – Marcadores DIC (a) e resolução de pixel (b).....	38
Figura 12 – Calorimetria das misturas.....	38
Figura 13 – Resistência à compressão verde para os tempos 00, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos .....	39
Figura 14 – Desenvolvimento da resistência inicial das misturas.....	41
Figura 15 – Padrões de ruptura nos corpos de prova cimentícios impressos em 3D testados no estado fresco aos 120 minutos de ensaio: (a–d) misturas sem fibras de PP e (e–h) misturas com fibras de PP. ....	42
Figura 16 – Amostras impressas.....	43
Figura 17 – Perda de água em relação a superfície exposta .....	44
Figura 18 – Taxa de evaporação (kg/m <sup>2</sup> h).....	45
Figura 19 – Retração plástica .....	46
Figura 20 – Retração plástica em relação à perda de água.....	47

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Deformações de retração plástica relatadas em 3DPC .....	30
Tabela 2 – Caracterização física dos materiais .....	31
Tabela 3 - Composição das misturas 3DCP.....	33

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

3DCP – Impressão 3D em concreto

SCMs – Materiais cimentícios suplementares

MK – Metacaulim

FC – Fíler calcário

CP – Cimento Portland

HPMC – Hidroxipropilmetilcelulose

SP – Superplastificante

a/c – Relação água/cimento

a/ms – Relação água/materiais secos

V<sub>p</sub> – Volume de pasta

PP – Polipropileno

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>1.2. Objetivos .....</b>	<b>14</b>
1.2.1. Geral .....	14
1.2.2. Específicos.....	14
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1. Materiais cimentícios impressos em 3D na construção civil .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2. Fatores que influenciam a retração plástica nos compósitos 3DCP .....</b>	<b>21</b>
<b>2.3. Materiais cimentícios suplementares.....</b>	<b>24</b>
<b>2.4. Parâmetros de impressão e retração plástica .....</b>	<b>25</b>
<b>2.5. Uso de fibras em materiais cimentícios impressos em 3D .....</b>	<b>26</b>
<b>2.6. Correlação de imagem digital como método para medição de retração plástica no 3DCP.....</b>	<b>28</b>
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. Materiais .....</b>	<b>31</b>
<b>3.2. Preparação das misturas e procedimento de impressão.....</b>	<b>32</b>
<b>3.3. Calorimetria.....</b>	<b>34</b>
<b>3.4. Resistência à compressão verde .....</b>	<b>35</b>
<b>3.5. Retração plástica e taxa de evaporação .....</b>	<b>36</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>4.1. Calorimetria.....</b>	<b>38</b>
<b>4.2. Resistência à compressão verde .....</b>	<b>39</b>
<b>4.3. Perda de água, taxa de evaporação e retração plástica .....</b>	<b>42</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. Trabalhos futuros .....</b>	<b>49</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 é o movimento relativo à tecnologia de automação inteligente. Nessa nova era, a utilização de habilidades modernas de fabricação, no contexto da integração de novas tecnologias de informação, desempenha um papel importante na competitividade econômica (Dilberoglu *et al.*, 2017). Uma das formas mais promissoras de melhorar a produtividade na indústria da construção é por meio da automação de partes do processo de construção, sendo a impressão 3D uma das possíveis tecnologias a serem aplicadas (Chen; García De Soto; Adey, 2018). A impressão 3D, ou manufatura aditiva (MA), é um processo automatizado de fabricação de produtos camada por camada de um elemento ou peça a partir de um projeto auxiliado por computador. Em comparação aos métodos construtivos tradicionais, o concreto impresso em 3D (3DCP) apresenta diversas vantagens. Entre suas características mais notáveis, destaca-se a eliminação do uso de fôrmas convencionais, o que resulta em maior flexibilidade no design arquitetônico, otimização do processo construtivo, redução de resíduos, maior sustentabilidade e diminuição do tempo e dos custos de execução das obras (Bischof; Mata-Falcón; Kaufmann, 2022).

Entretanto, a ausência de fôrmas também traz desafios, como a maior suscetibilidade das estruturas impressas a deformações plásticas precoces, incluindo retração plástica (Li *et al.*, 2020). Esse fenômeno ocorre quando o concreto sofre redução de volume devido à perda de umidade e contração antes da pega, ou seja, antes de endurecer (Ler *et al.*, 2024). Markin, Combrinck e Mechtcherine (2024) destacam que a taxa de evaporação do concreto é intensificada em condições que aumentam a área superficial exposta à dessecação e a quantidade de água livre disponível para evaporar. Como resultado, o 3DCP é mais propenso ao surgimento de fissuras por retração plástica em comparação ao concreto moldado convencional, o que pode comprometer a durabilidade das estruturas (Markin *et al.*, 2024). Temperaturas elevadas, baixa umidade e ventos fortes aceleram a retração plástica do concreto, e, se essa retração for restringida, surgem fissuras (Zeng *et al.*, 2022). Essas fissuras comprometem a estética e a durabilidade do concreto. Em regiões áridas e semiáridas, esse problema é comum quando não são adotadas precauções adequadas. A rápida evaporação da água de exsudação induz tensões de tração no concreto e, se essas tensões superarem sua resistência à tração, ocorrem fissuras (Markin; Combrinck; Mechtcherine, 2024)

Estudos com técnicas de correlação de imagem digital mostram que as deformações por retração plástica podem ser até duas vezes maiores em misturas para impressão 3D em

comparação com o concreto moldado convencional, testado sob condições ambientais semelhantes (Moelich; Kruger; Combrinck, 2022). Há diversos fatores que podem acelerar ou retardar a retração plástica. São eles: tamanho do elemento de concreto impresso, proporção da mistura (relação água/cimento, aditivos, teor de finos, adições) e condições ambientais (umidade relativa, velocidade do vento, temperatura da superfície do concreto, temperatura do ar). Além das deformações por retração plástica, a resistência à compressão verde, é um parâmetro fundamental no concreto impresso em 3D, pois está diretamente relacionada à estabilidade das camadas recém-depositadas e à capacidade do material de sustentar cargas logo após a extrusão. Dessa forma, controlar e mitigar esses fatores se tornam desafios significativos na impressão 3D.

Além disso, em comparação com o concreto moldado convencional, materiais cimentícios impressos em 3D podem demandar uma quantidade significativamente maior de cimento Portland e um teor de agregados consideravelmente menor (Chen *et al.*, 2022). Estudos mostram que, em muitas formulações imprimíveis, a razão agregado/aglomerante fica em torno de 1,0, 1,5, até 2,0, dependendo da composição e requisitos de extrudabilidade e construtibilidade (Barbosa *et al.*, 2022; De Souza Dias *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2020; Mohan *et al.*, 2022). Isso implica em maior volume de pasta nas misturas de impressão 3D, decorrente de baixas relações agregado/aglomerante, e contribui para maiores níveis de retração plástica, aumentando a suscetibilidade à fissuração (Els; Van Zijl; De Villiers, 2025a; Moelich; Kruger; Combrinck, 2020; Zhang *et al.*, 2021a).

Do ponto de vista material, o elevado teor de cimento Portland, na maioria das misturas imprimíveis, é um problema significativo que prejudica a sustentabilidade do 3DCP, uma vez que a indústria do cimento é uma das maiores responsáveis pelas emissões globais de dióxido de carbono, contribuindo com cerca de 7% do total de origem antropogênica (Supriya *et al.*, 2023). Há duas estratégias para desenvolver materiais cimentícios com baixo teor de cimento Portland no campo do 3DCP: (1) Usar materiais cimentícios suplementares (SCMs) ou outros tipos de cimento com baixo teor de carbono para substituir um grande volume de cimento Portland convencional; (2) Reduzir o teor de ligante aumentando a proporção de agregado. Nesse contexto, a substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (SCM), como filer calcário e metacaulim, surge como uma estratégia promissora para reduzir impactos ambientais sem comprometer o desempenho das misturas imprimíveis (Chen *et al.*, 2022).

Para reduzir a fissuração induzida pela retração em materiais cimentícios impressos em 3D, a adição de fibras tornou-se uma escolha comum, especialmente em aplicações de

engenharia. Fibras com baixo módulo de elasticidade, como as de polipropileno (PP), possuem boa ductilidade e são frequentemente utilizadas para aumentar a resistência à fissuração de materiais à base de cimento. Como medida para mitigar fissuras por retração plástica, Moelich, Kruger e Combrinck (2022) comprovaram que a incorporação de uma pequena dosagem de microfibras de polipropileno curtas pode mitigar completamente as trincas por retração plástica no 3DPC, sem afetar sua capacidade de impressão. Tran; Cu e Le (2021) chegaram a uma conclusão semelhante, afirmando que as fibras de polipropileno podem retardar o início das trincas por retração do concreto e aumentar a deformação máxima de tração do 3DPC antes que as trincas ocorram.

### 1.1. Justificativa

A impressão 3D de materiais cimentícios possivelmente é uma das alternativas mais promissoras e eficazes para a industrialização da construção civil, sendo essa técnica construtiva cada vez mais abordada nas pesquisas em diversos países (Buswell *et al.*, 2018). O setor da construção civil tem testemunhado um aumento na popularidade da impressão 3D em concreto, um método que elimina a necessidade de fôrmas, extrudando o concreto através de um bocal para criar camadas sucessivas de uma estrutura (Ahmed; Askandar; Jumaa, 2022). A combinação de baixas relações agregado/aglomerante e o volume reduzido de agregados graúdos em relação ao concreto moldado in loco, juntamente com a ausência de cura e fôrmas, tem demonstrado aumentar tanto a retração plástica quanto a retração por secagem e, em alguns casos, levar ao surgimento de fissuras de retração (Els; Van Zijl; De Villiers, 2025a)

Os danos causados pela retração plástica e as fissuras associadas comprometem significativamente a durabilidade, a funcionalidade, a estética e a estabilidade estrutural de elementos de concreto impressos em 3D (Moelich; Kruger; Combrinck, 2020). Além disso, surgem vários desafios na medição da retração do concreto enquanto este permanece no estado plástico (Federowicz *et al.*, 2026). Em particular, a geometria única dos elementos impressos em 3D, a ausência de moldes, o processo de deposição camada por camada e as rápidas alterações nas propriedades do material logo após a deposição dificultam o uso de técnicas de medição convencionais. Esses fatores tornam difícil isolar e quantificar as deformações por retração plástica em tempo real, principalmente sob condições ambientais e sem perturbar a estrutura impressa. Medidas de redução adequadas podem prevenir ou minimizar a retração plástica e o consequente surgimento de fissuras. No entanto, a eficácia de diversas abordagens de mitigação para reduzir a retração e o surgimento de fissuras em elementos e estruturas impressos em 3D ainda não foi adequadamente investigada (Chen *et al.*, 2024).

Embora a incorporação de fibras e de materiais cimentícios suplementares (SCMs) em misturas para impressão 3D de materiais cimentícios já tenha sido investigada, a maior parte dos estudos anteriores concentrou-se em avaliar, de forma isolada, o impacto do tipo e do teor de fibras ou SCMs, em condições experimentais específicas. Faltam, porém, investigações que abordem a influência simultânea do comprimento das fibras, da composição da mistura e do volume de pasta na retração plástica e na resistência à compressão verde de concretos impressos em 3D. Poucas pesquisas exploram como esses fatores, associados a diferentes proporções de agregado/aglomerante e à substituição parcial do cimento por SCMs, afetam tais propriedades de desempenho, o que dificulta a formulação de recomendações práticas para o controle da fissuração e para a melhoria do desempenho de elementos impressos em 3D. Portanto, há uma lacuna na literatura ao não correlacionar esses parâmetros, considerando inclusive o contexto de substituições parciais de cimento por SCMs, aspectos reológicos e propriedades mecânicas em idades iniciais. Dessa forma, este estudo busca preencher essa lacuna ao investigar a influência do comprimento das fibras de polipropileno e de diferentes composições de mistura, associadas a distintos volumes de pasta, nas deformações por retração plástica e na resistência à compressão verde de materiais cimentícios impressos em 3D. Para isso, foram avaliadas misturas com variações na proporção agregado/ligante e em diferentes teores de cimento Portland, obtidos por meio da substituição parcial do cimento por filer calcário e metacaulim, utilizando a técnica de correlação de imagens digitais (DIC) em duas dimensões para monitorar as deformações em idades iniciais.

## **1.2. Objetivos**

A seguir são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos da pesquisa.

### **1.2.1. Geral**

O objetivo geral deste estudo é avaliar a influência de diferentes volumes de pasta e da adição de fibras na retração plástica e resistência verde de peças de concreto impressas em 3D (3DCP).

### **1.2.2. Específicos**

A partir do objetivo geral desta pesquisa, delimita-se os objetivos específicos em:

- Avaliar a influência da composição da mistura na retração plástica e resistência verde, considerando as adições minerais e o teor de agregado.

- Analisar o efeito da incorporação e do comprimento das fibras nas deformações por retração plástica e na resistência verde das peças impressas.
- Investigar se há correlação entre a retração plástica e a resistência no estado fresco.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Materiais cimentícios impressos em 3D na construção civil

A Indústria 4.0 caracteriza-se pela integração de processos industriais com tecnologias digitais, permitindo a atuação conjunta e inteligente de máquinas, robôs e equipamentos (Maskuriy *et al.*, 2019). Nesse contexto, o progresso da manufatura aditiva, alinhado aos conceitos de industrialização e modernização propostos pela Indústria 4.0, tem impulsionado o uso de novos métodos emergentes e automatizados (Nodehi *et al.*, 2022). A manufatura aditiva consiste em um método inovador de construir uma estrutura tridimensional por meio da deposição de material, camada sobre camada, dispensando a necessidade de fôrmas.

O concreto impresso em 3D (3DCP) é geralmente aclamado por suas muitas vantagens em relação aos métodos de construção tradicionais, incluindo a simplificação das cadeias de suprimentos, a eliminação da necessidade de fôrmas na fabricação de componentes, a redução da carga de trabalho de gerenciamento no local para os profissionais envolvidos e a eliminação de andaimes temporários para a construção de paredes. A flexibilidade de produção, especialmente para geometrias complexas, ajuda a aumentar a produtividade e a reduzir custos e desperdícios. Assim, o 3DCP é identificado como uma porta de entrada para a digitalização do setor da construção em todo o processo construtivo, do projeto à fabricação.

A construção convencional de concreto apresenta restrições de projeto, é menos produtiva em comparação com outros setores, requer a utilização de fôrmas e envolve uma considerável quantidade de trabalho manual (Tabassum; Mir, 2023; Rehman; Birru; Kim, 2023). Além disso, pesquisadores indicam que a incorporação da tecnologia de impressão 3D na construção reduz o uso de materiais e minimiza o desperdício, potencialmente diminuindo os custos da obra (Pessoa *et al.* 2021; Schuldt *et al.* 2021).

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, é uma maneira inovadora de construir estruturas de concreto em camadas, utilizando um sistema robótico automatizado a partir de um modelo digital. O progresso da manufatura aditiva, alinhado aos conceitos de industrialização e modernização, como a Indústria 4.0, tem impulsionado a utilização de novos métodos emergentes e automatizados (Nodehi *et al.*, 2022). Embora esse método seja amplamente aplicado em campos avançados da ciência, como biomédica, aeroespacial e automotiva, seu desenvolvimento na indústria da construção ainda está em seus estágios iniciais (Baduge *et al.*, 2020).

A indústria da construção tem sido historicamente uma das menos tecnologicamente avançadas, caracterizada por processos lentos, de mão de obra intensiva e que demandam muito tempo. Tradicionalmente, a construção de edifícios e infraestruturas envolve diversas etapas, desde o projeto até a aquisição de materiais e a montagem. Esse processo é demorado, trabalhoso e frequentemente afetado por atrasos, custos elevados e preocupações com segurança. A construção convencional de concreto apresenta restrições de design, depende das competências dos trabalhadores para garantir sua qualidade, é menos produtiva em comparação com outras indústrias, requer a utilização de fôrmas e envolve uma considerável quantidade de trabalho manual (Tabassum; Mir, 2023; Rehman; Birru; Kim, 2023).

Por isso, a tecnologia da impressão 3D se desenvolveu rapidamente na última década devido ao seu potencial de superar essas deficiências da construção tradicional. Em comparação com os processos usuais de design e fabricação, essa tecnologia oferece uma maior liberdade de modelagem, um menor consumo de material e uma redução da poluição ambiental, tornando-a adequada para construções verdes e inteligentes (JAVOID *et al.*, 2021).

Salazar *et al.* (2022) afirmam que a manufatura aditiva tem um futuro promissor garantido e sem dúvidas será amplamente empregada pelo setor de construção para a impressão 3D de habitações, de forma sustentável e com custo mais acessível. De acordo com Alami *et al.* (2023) a impressão 3D em concreto (3DCP) apresenta uma vantagem significativa em termos de custo, com potencial de economizar aproximadamente 78% e 60% dos custos relacionados aos métodos de construção convencionais e mão de obra, respectivamente, enquanto consome 20% menos água que esses métodos. Adicionalmente, prevê-se que a 3DCP reduzirá a utilização global de energia em 5% até 2025 (Alami *et al.*, 2023). Apresenta uma redução de 30% do desperdício de material durante a construção, proporciona ainda a eliminação da poluição sonora, a redução do consumo de combustível, o impacto do transporte e as emissões associadas e, apesar de seu único ponto fraco ambiental ser o elevado consumo de cimento, esse desafio pode ser mitigado por meio da utilização de agregados locais e da reciclagem de materiais como substitutos parciais do cimento (Ahmed, 2023).

A impressão 3D é aplicada com sucesso e desperta o interesse da indústria da construção devido às suas vantagens: alta eficiência, economia de custos sem a necessidade de moldes ou fôrmas de construção, economia de mão de obra e alta liberdade de design para criação de estruturas personalizadas (Rehman; Birru; Kim, 2023). Além disso, o 3DCP possibilita a redução do peso próprio das estruturas de concreto e o aprimoramento das propriedades de isolamento térmico por meio da otimização topológica e do uso de agregados leves na mistura (Rehman; Birru; Kim, 2023). Atualmente, a impressão de concreto em 3D é um dos campos de

desenvolvimento mais rápido na construção. Técnicas como Contour Crafting, D-Shape e impressão de concreto com base em extrusão podem ser vistas no 3DCP (Tran; Cu; Le, 2021). O 3D Concrete Printing (3DCP), método de manufatura aditiva muito utilizado, fundamenta-se na extrusão de uma mistura cimentícia em um filamento contínuo, depositado a partir de um bocal frequentemente posicionado em um pórtico, de forma que o filamento se una à camada anterior e mantenha a sua forma (Buswell *et al.*, 2018).

Desde então, diversos estudos sobre a manufatura aditiva (MA) de materiais cimentícios têm sido desenvolvidos, abordando tanto a formulação de misturas quanto a avaliação do desempenho e do comportamento mecânico dos objetos impressos. Esses avanços possibilitaram uma maior exploração do uso da tecnologia na construção de edificações e estruturas.

Na última década, mais de 30 grupos de pesquisa ao redor do mundo se dedicaram a investigações relevantes, promovendo um rápido desenvolvimento na área (Ahmed; Askandar; Jumaa, 2022). Nesse contexto, a Universidade de Tecnologia de Eindhoven, que imprimiu a primeira ponte de concreto para ciclistas do mundo, em *Gemert* nos Países Baixos (Figura 1a), com vão de 6,5 metros, largura de 3,5 metros e tempo total de impressão de 48 horas (Salet *et al.*, 2018). Já em 2021, foi inaugurada a mais longa ponte de concreto para bicicletas em 3D do mundo, localizada em Nijmegen, na Holanda, e mede 29 metros de comprimento (Figura 1b). Ela foi projetada e impressa usando a tecnologia de impressão em concreto 3D pela Universidade de Tecnologia de Eindhoven, em colaboração com a Saint Gobain Weber Beamix e a BAM Infra (Raaijmakers, 2021). Além disso, a universidade, em parceria com outros colaboradores, desenvolveu a casa conhecida como Projeto Milestone (Figura 2), que se tornou a primeira casa impressa em concreto 3D habitada na Europa (Wolfs; Bos; Salet, 2023).

Além disso, a universidade, em parceria com outros colaboradores, desenvolveu a casa conhecida como Projeto Milestone (Figura 2), que se tornou a primeira casa impressa em concreto 3D habitada na Europa (Wolfs; Bos; Salet, 2023).

De acordo com Javaid *et al.*, (2021) comparada aos métodos tradicionais de design e fabricação, a impressão 3D proporciona maior liberdade de modelagem, reduz o consumo de material e minimiza a poluição ambiental, sendo uma opção viável para construções sustentáveis e inteligentes. Esse processo oferece flexibilidade geométrica e de design, permitindo a produção de elementos estruturais que seriam difíceis de conceber na construção convencional, que utilizam fôrmas (Bhattacharjee *et al.*, 2021).

Figura 1 – Ponte de concreto impressa em 3D: (a) em Gemert, (b) em Nijmegen, nos Países Baixos.



Fonte: (a) Salet *et al.*, (2018); (b) Raaijmakers, (2021)

Figura 2 – A primeira casa impressa em 3D do Projeto Milestone (Foto de Bart van Overbeeke) e sua planta baixa



Fonte: Wolfs; Bos; Salet, (2023)

Outras aplicações inovadoras, recordistas ou não convencionais da impressão 3D são mostradas na Figura 3. A Figura 3a ilustra uma mini casa de 37 m<sup>2</sup> impressa em 3D em Holstebro, Dinamarca; a Figura 3b mostra uma das casas de 1280 pés quadrados do “Projeto Virginia-2022” com tempo de impressão de 28 h; a Figura 3c exibe as impressoras 3D NEXCON usadas no Projeto Virginia; na Figura 3d observa-se uma casa impressa em 3D pela ICON, construída com impressora portátil tipo pórtico e pasta cimentícia exclusiva para 3DCP. Protótipo de 32,5 m<sup>2</sup> finalizado em 47 horas de impressão em Austin (2018), com custo aproximado de US\$ 10.000, servindo como base para projeto de habitações populares resistentes a terremotos em Tabasco; a Figura 3e apresenta a casa de concreto impressa em 3D “Gaia Italy”, com custo de US\$ 1000, impressa pela empresa italiana de impressão 3D WASP, através de uma mistura de concreto e solo. Figura 3f apresenta a residência Genesis projetada pela Contour3D como solução econômica para a crise habitacional australiana. A construção combina paredes curvas no pavimento inferior e geometria reta no superior, integrando painéis

estruturais isolados da Versiclad para maior eficiência energética e redução de resíduos. O projeto inclui cerca de 100 painéis de parede e 180 m<sup>2</sup> de cobertura isolada. A Figura 3g apresenta o *Boulder Park*, na província de Shandong, projetado pelo estúdio Xisui Design, com estruturas em concreto impressas em 3D que simulam rochas e formam pontes, túneis e jardineiras. Inserido em uma área comunitária de 13.000 m<sup>2</sup> em Jinan, o parque inclui três zonas temáticas: parque aquático, playground de pedras e bosque, integrando elementos naturais e espaços lúdicos em formato de cavernas. na Figura 3h observa-se a ponte em 3DPC mais longa do mundo (26,2 m) em Xangai e a Figura 3i apresenta ponte inteligente de Amsterdã, impressa em 3D pela MX3D.

Apesar da diversidade de processos, materiais e máquinas, a maioria das tecnologias de impressão 3D apresenta fabricação em camadas, processamento automatizado de materiais e ausência de fôrmas. Dessa forma, há características específicas e inerentes ao concreto impresso em 3D que devem ser cuidadosamente consideradas no controle de qualidade (Mechtcherine *et al.*, 2022). Ao contrário do concreto moldado convencionalmente, os produtos de concreto impressos em 3D podem apresentar interfaces porosas e com fraca aderência entre as camadas, que formam os elos mais fracos em toda a estrutura e implicam em anisotropia pronunciada (Sanjayan *et al.*, 2018).

Figura 3 – Exemplos de aplicação de 3DCP

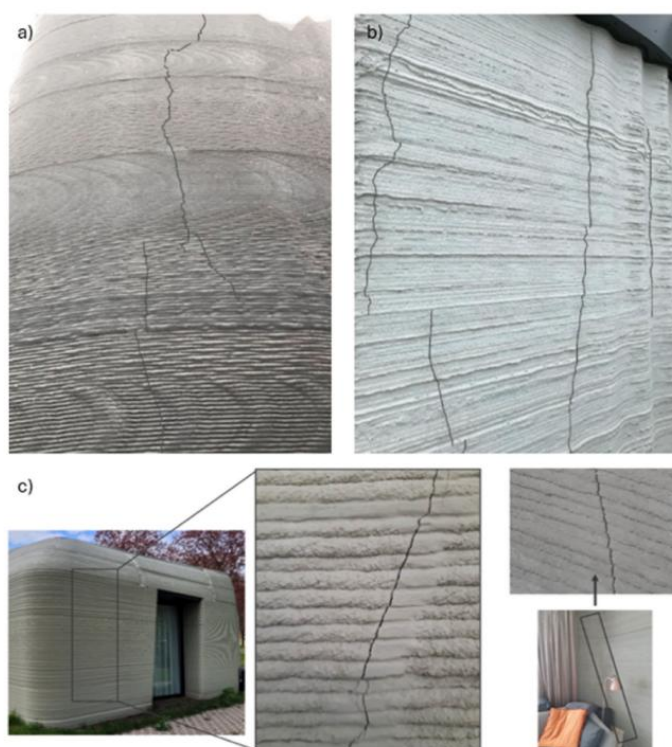


Fonte: (a) COBOD (2022), (b) e (c) Houser (2022), (d) Grace (2019), (e) Chiusoli (2018), (f) Jacob (2025), (g) Astbury (2025), (h) Dixon (2019) e (i) MX3D (2021)

As proporções da mistura e o processo de impressão 3D representam um desafio, pois, sem a utilização de fôrmas, as estruturas de concreto impressas ficam expostas a retrações

rápidas, incluindo retração por secagem, autógena e, principalmente, retração plástica nas primeiras horas após a impressão. Esse fenômeno e as fissuras decorrentes podem comprometer as propriedades mecânicas de longo prazo do concreto impresso em 3D, como pode ser observado na Figura 4. Portanto, os parâmetros de impressão devem ser cuidadosamente investigados durante os testes e considerados no projeto estrutural da peça impressa em 3D.

Figura 4 – Fissuras relacionadas à retração presentes em a) um edifício residencial de dois andares impresso, b) a primeira estrutura 3DPC na Europa e c) as paredes externas e internas de um edifício residencial construído na Holanda.



Fonte: adaptado de (Els; Van Zijl; De Villiers, 2025a)

## 2.2. Fatores que influenciam a retração plástica nos compósitos 3DCP

A retração plástica é o fenômeno associado à redução volumétrica dos materiais cimentícios no estado fresco devido a perda de água. Ela ocorre antes da pega, quando a taxa de evaporação supera a exsudação, gerando tensões capilares que promovem a contração da matriz antes da pega (Nodehi *et al.*, 2022). O mecanismo responsável pela retração plástica é o acúmulo de pressão capilar negativa nas capilares do concreto, causado pela evaporação da água nos poros. Essa pressão capilar negativa leva a contrações volumétricas ou retração tridimensional do material (Markin; Combrinck; Mechtcherine, 2024). Esse fenômeno,

juntamente com as fissuras resultantes, pode afetar as propriedades mecânicas ao longo prazo do concreto impresso em 3D (Nodehi *et al.*, 2022).

O principal fator externo que controla o aumento da pressão capilar é a taxa de evaporação, que é influenciada pela temperatura da superfície do concreto, temperatura do ar, umidade relativa do ambiente e velocidade do vento (Niu *et al.*, 2020; Uno, 1998). Imediatamente após a deposição, as misturas 3DCP ficam expostas a fatores ambientais, como temperatura ambiente, umidade e vento. Esses fatores não apenas influenciam a evaporação da água dos poros, mas também podem acelerar a taxa de hidratação, especialmente em temperaturas mais altas (Ahmadi, 2000). Qu *et al.*, (2024) afirmam que fissuras por retração plástica podem ocorrer em temperaturas normais, mas são mais comuns em concretagens sob clima quente, especialmente em temperaturas elevadas.

A rápida perda de água cria gradientes de umidade dentro do concreto, gerando tensões de tração que, se excederem a resistência do material no estado plástico, resultam em fissuras por retração plástica (Zhao *et al.*, 2022) Essas fissuras comprometem a durabilidade das estruturas de concreto, permitindo a infiltração de água, cloretos e outras substâncias corrosivas. Podendo resultar em corrosão da armadura de aço, aumento da carbonatação do concreto e, se o 3DPC não for reforçado, diminuir a capacidade de tração (Moelich; Kruger; Combrinck, 2020). Portanto, controlar a porosidade da matriz cimentícia e as condições ambientais durante a cura do concreto é fundamental para minimizar o risco de fissuras por retração plástica (Ler *et al.*, 2024).

Como a tecnologia 3DCP dispensa o uso de fôrmas, a taxa de evaporação volumétrica da água aprisionada aumenta devido à maior área de superfície exposta à secagem, em comparação com o concreto aplicado de forma convencional (Ghourchian *et al.*, 2021). Esse aumento na secagem resulta em uma retração plástica acentuada. Outros fatores também devem ser considerados, como o aumento da retração à medida que a espessura do elemento de concreto diminui em relação às suas outras dimensões. Isso ocorre principalmente devido às variações na razão entre a superfície e o volume das camadas impressas e, conseqüentemente, das paredes impressas (Markin; Combrinck; Mechtcherine, 2024). De acordo com Ghourchian *et al.* (2021) a retração aumenta com a redução da espessura do elemento e o aumento do teor de finos, podendo causar fissuras.

A adição de fibras, o uso de cinza volante e cimento sulfoaluminato, a redução da relação água/cimento, o aumento da relação areia/cimento e o uso de aditivos redutores de retração resultam em misturas com baixa retração (Zhang *et al.*, 2024). Esses aditivos contribuem para diminuir a quantidade de água necessária na mistura, enquanto o aumento da proporção de areia

em relação ao cimento também contribui para a redução da retração (Hamidi; Aslani, 2019). Uma vez que, de acordo com Cohen; Olek; Dolch, (1990) a fissuração por retração plástica também é influenciada pelos efeitos das partículas de areia, que ajudam a interromper fissuras e criar canais de água. Durante o período inicial de secagem da argamassa, esses canais preenchidos por água secam primeiro, funcionando como elementos de sacrifício que protegem a argamassa dos efeitos negativos da evaporação da água dos poros menores (Cohen; Olek; Dolch, 1990).

Os agregados são um componente fundamental do concreto e essenciais para determinar suas propriedades de engenharia. As características dos agregados, incluindo tamanho, granulometria, forma e resistência, influenciam diretamente a trabalhabilidade, a resistência mecânica e a durabilidade do concreto. No concreto impresso em 3D (3DPC), o teor de agregados desempenha um papel significativo no desempenho. O excesso de agregados pode causar dificuldades de bombeamento ou entupimento dos bicos, o que pode reduzir o desempenho mecânico. Por outro lado, a insuficiência de agregados no concreto aumenta o consumo de ligante, levando a custos de material mais elevados, maiores emissões de carbono e menor estabilidade volumétrica (Wang *et al.*, 2025).

O agregado fino é preferido na maioria das aplicações de extrusão devido ao risco de entupimento dos bicos da impressora quando há presença de agregado graúdo. A relação ideal entre areia e ligante para um desempenho adequado de extrusão varia de 1,5 a 2 em massa (Girskas; Kligys, 2025). Misturas com uma relação areia/ligante inferior a 1 apresentam melhor extrudabilidade, mas insuficiente capacidade de construção. Embora o agregado graúdo seja geralmente menos desejável no projeto de materiais cimentícios impressos, ele pode influenciar positivamente a trabalhabilidade, proporcionando maior estabilidade dimensional. De modo geral, areia de rio com uma relação areia/aglomerante ideal é preferível para o projeto de materiais cimentícios extrudáveis e com boa trabalhabilidade.

Entretanto, um maior volume de pasta em misturas de concreto normalmente aumenta a retração plástica, elevando assim o risco de fissuração em idades precoces. A pasta, composta de cimento, água e aditivos, é o componente que sofre retração, enquanto os agregados fornecem contenção. Aumentar a relação pasta/agregado reduz a resistência interna do material às variações de volume, aumentando assim o potencial de fissuração (Lian *et al.*, 2025).

Dessa forma, a retração do concreto geralmente está relacionada ao volume de pasta na mistura. Reduzir o teor de pasta diminui a retração. Na prática, o volume de pasta pode ser minimizado para controlar a retração. Essa redução pode ser alcançada melhorando o empacotamento das partículas dos agregados.

### 2.3. Materiais cimentícios suplementares

Em comparação com o concreto moldado, materiais cimentícios impressos em 3D podem demandar uma quantidade significativamente maior de cimento Portland (Chen *et al.*, 2022). A fabricação de cimento é considerada uma das indústrias que mais emite dióxido de carbono no mundo. O principal componente do cimento Portland comum (aproximadamente 95% em massa) é o clínquer, que é composto por silicatos de cálcio, aluminatos de cálcio e aluminoferritas. A produção de clínquer gera, em média, 842 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada (Scrivener; John; Gartner, 2018). O elevado teor de pasta, na maioria das misturas imprimíveis, é um problema significativo que prejudica a sustentabilidade do 3DCP, sendo possível resolver isso por meio da substituição parcial do cimento por materiais cimentícios suplementares (SCMs) (Chen *et al.*, 2022).

O uso de SCMs não só reduz o consumo total de cimento, mas também oferece propriedades pozolânicas que aprimoram a resistência mecânica, durabilidade e trabalhabilidade do concreto. Além disso, esses materiais contribuem para a destinação de subprodutos industriais e resíduos agrícolas, evitando que sejam descartados em aterros sanitários e, assim, minimizando o impacto ambiental. Diante da necessidade global de reduzir as emissões de dióxido de carbono e adotar práticas mais sustentáveis na construção, é essencial reconhecer o papel fundamental dos SCMs na transição para um concreto com baixo carbono (Hilloulin; Ummunakwe, 2024).

A substituição do cimento Portland (PC) por material cimentício suplementar ou fillers, como metacaulim ou fíler calcário, é conhecida por afetar as propriedades químicas do concreto, influenciando assim suas propriedades frescas e endurecidas (Celik *et al.*, 2019). Além disso, Medjigbodo *et al.* (2018) destacam que a incorporação de fíler calcário em misturas de metacaulim-cimento demonstram melhorar a trabalhabilidade, pois reduz tanto a demanda de água quanto a quantidade necessária de superplastificante. Sílica ativa, nano sílica, metacaulim, diatomita e outras pozolanas, como cinzas vulcânicas, melhoram os valores de tensão de escoamento estático do 3DCP e, portanto, a capacidade de construção é afetada positivamente mesmo em baixas dosagens (Saruhan; Keskinateş; Felekoğlu (2022).

O efeito da substituição do cimento por adições minerais na retração do concreto se deve a fatores químicos e físicos. Quimicamente, a reação pozolânica dos aditivos minerais consome água de forma diferente da hidratação do cimento, alterando a pressão capilar nos poros e afetando a retração (Ma *et al.*, 2025). De acordo com Tran; Cu; Le, (2021) normalmente as misturas de concreto para impressão 3D possuem um alto teor de ligante, que é uma combinação

de outras adições minerais, como pó de calcário, sílica ativa ou cinza volante com cimento. Além disso, apresentam uma baixa relação água/ligante e utilizam agregados finos com tamanho máximo de 2 mm. Essas misturas formam estruturas densas com granulometria fina, garantindo estabilidade dimensional com mínima ou nenhuma deformação sob o peso das camadas superiores. Além disso, proporcionam alta resistência mecânica em pouco tempo e apresentam um tempo de pega acelerado. Como um componente essencial das misturas para uma impressão bem-sucedida, Nodehi *et al.* (2022) afirmam que os SCMs desempenham um papel fundamental como modificadores reológicos, agentes redutores de retração e melhoram o desempenho mecânico e de durabilidade do concreto produzido.

#### **2.4. Parâmetros de impressão e retração plástica**

O processo da impressão 3D depende de um conjunto específico de parâmetros que podem ter um impacto significativo no desempenho e na durabilidade a longo prazo das seções impressas, especialmente pois se espera que elas sejam expostas a ambientes externos (Nodehi *et al.*, 2022).

Parâmetros reológicos do material, como tensão de escoamento, viscosidade plástica e tixotropia, bem como a resistência verde e rigidez, aliados aos parâmetros de impressão como tipo de extrusora, a velocidade de impressão, a taxa de extrusão, as dimensões, o formato e a altura do bico extrusor, assim como o tempo de deposição entre as camadas, são fatores que podem influenciar o aspecto final da peça impressa (Buswell *et al.*, 2018; Panda; Lim; Tan, 2019). A resistência verde é a capacidade do concreto de resistir à deformação causada por cargas aplicadas, na qual uma resistência verde mais alta resulta em melhor capacidade de construção (Wolfs; Bos; Salet, 2019). Essa fase, definida por Voigt; Malonn e Shah (2006) é usada para descrever a resistência à compressão uniaxial de misturas no estado fresco.

Já a capacidade de bombeamento, a extrudabilidade e a capacidade de construção são as três principais propriedades que determinam a capacidade de impressão dos materiais de concreto (Fasihi; Libre, 2024). A extrudabilidade é definida como a capacidade do material de ser ejetado suavemente pelo bico de impressão sem causar qualquer bloqueio dos tubos ou danos significativos à qualidade do material (ISO/ASTM 52939, 2023). Em outras palavras, é o equilíbrio entre a fluidez ou a trabalhabilidade da argamassa de concreto para ter características de auto compactação e de dispersão em que não ocorram segregação e exsudação (Liu *et al.*, 2020). Em geral, a segregação ocorre quando a pasta é insuficiente para atuar como lubrificante para as partículas de areia ou de agregado.

De acordo com a literatura, a segregação e a exsudação podem causar uma distribuição não uniforme dos materiais constituintes, comprometendo significativamente a durabilidade a longo prazo das seções de 3DPC devido à interface enfraquecida entre o agregado e a pasta de cimento. Esse fenômeno pode, ainda, aumentar o risco de rachaduras, resultantes do assentamento do agregado e da maior tendência de retração em áreas com maior densidade de ligante (Panesar; Shindman, 2012).

O desenvolvimento do ganho de resistência e das fissuras internas do 3DPC difere do concreto moldado convencional (Ma *et al.*, 2020). Nesse sentido, o desenvolvimento da rigidez de cada camada no concreto que mantém cada camada em forma desempenha um papel fundamental na qualidade das seções impressas em 3D. Em geral, a capacidade de cada camada impressa de suportar a tensão e a deformação impostas, como resultado do próprio peso e das camadas subsequentes, é definida como capacidade de construção ou estabilidade do 3DPC (Al-Qutaifi; Nazari; Bagheri, 2018). De certa forma, essas propriedades estão intimamente relacionadas às características do concreto impresso, em que a integração de materiais, o desenvolvimento de ganho de resistência com o tempo, a fluidez e a prevenção de rachaduras por retração plástica são preocupações. Nesse sentido, a velocidade de impressão, a reologia do concreto, as proporções de aglomerantes para cimento e de areia para cimento são os principais componentes da estabilidade geral dos concretos impressos e de sua respectiva qualidade (Nodehi *et al.*, 2022).

## **2.5. Uso de fibras em materiais cimentícios impressos em 3D**

A incorporação de fibras ao concreto tem sido amplamente empregada com o objetivo de aprimorar seu desempenho mecânico e controlar a formação de fissuras. No contexto da impressão 3D de concreto (3DCP), o uso de fibras de reforço constitui uma estratégia eficaz para mitigar fissuras decorrentes da retração plástica e de tensões térmicas (Kristombu Baduge *et al.*, 2021). A atuação benéfica das fibras está associada à sua capacidade de restringir a formação e propagação de fissuras, aumentar a capacidade de deformação da mistura no estado fresco e promover o efeito de ponte (*bridging*), transferindo tensões através das superfícies fissuradas e dificultando a evolução de microfissuras para fissuras visíveis (Huang *et al.*, 2026).

Diversas pesquisas sobre a retração do concreto impresso em 3D têm sido realizadas e têm demonstrado que a retração varia de camada para camada, além de reduzir com o aumento da fração de fibras nas misturas cimentícias (Tiberti *et al.*, 2018; Sayahi *et al.*, 2019; Le *et al.*, 2012). A utilização de fibras de polipropileno em baixas frações volumétricas melhora diversos

aspectos da produção e aplicação do concreto reforçado com fibras, incluindo o controle da retração e da fissuração, a resistência ao impacto e a tenacidade (Ahmad *et al.*, 2022).

A fibra de polipropileno (PP) é um polímero linear sintético produzido pela polimerização do propileno. Oferece vários benefícios, incluindo propriedades de leveza, resistência elevada, tenacidade excepcional, resistência à corrosão e isolamento térmico eficaz. A baixa densidade do PP e o peso facilitam a manipulação da mistura, tornando-a altamente compatível com o processo de impressão 3D (Vargas; Robayo-Salazar; Mejía de Gutiérrez, 2024). Fibras curtas podem ser extrudadas por meio do bocal sem causar entupimento, permitindo que o reforço de fibra seja facilmente integrado ao 3DCP (Kristombu Baduge *et al.*, 2021).

Após a fissuração da matriz, as fibras de PP atuam na transferência de tensões de tração por meio das fissuras, restringindo sua abertura e favorecendo a formação de múltiplas fissuras finas, em detrimento de fissuras de maior comprimento (Tan *et al.*, 2025). Esse mecanismo está relacionado à aderência fibra-matriz, que influencia diretamente a rigidez do compósito. À medida que a resistência de aderência aumenta, eleva-se a capacidade de restrição, imposta pelas fibras, à retração da pasta cimentícia (Kanavaris *et al.*, 2019).

De modo geral, as fibras restringem a retração mesmo no estágio inicial do processo de endurecimento da matriz de cimento. Isso pode ser explicado com base na ligação entre as fibras e os materiais cimentícios. À medida que a resistência da ligação entre as fibras e a pasta de cimento aumenta, a rigidez geral do compósito fibra-pasta de cimento também aumenta (Kanavaris *et al.*, 2019). Isso cria um efeito de restrição, reduzindo a retração total. Van Der Putten *et al.*, (2021) observam que as fibras de menor tamanho tendem a restringir a matriz em maior grau e, portanto, parecem ser mais benéficas em relação à redução da retração.

A avaliação do comportamento de fissuras em materiais cimentícios impressos em 3D é de grande importância devido à sua contribuição para as propriedades mecânicas, confiabilidade estrutural e planos de reabilitação (Tan *et al.*, 2025). Além disso, a interpretação de fraturas identifica pontos críticos para possíveis formas inovadoras de utilização de materiais cimentícios produzidos por impressão 3D. Considerando as fissuras como uma provável via de entrada para agentes nocivos, como o dióxido de carbono, que podem representar uma ameaça para estruturas à base de cimento, as fibras de polipropileno (PP) demonstraram reduzir o problema (Garg; Azarsa; Gupta, 2021). A redução na trabalhabilidade com a incorporação de fibras é atribuída principalmente ao aumento da área superficial dentro da matriz de concreto. Com a adição de fibras, uma quantidade maior de pasta de cimento é necessária para revesti-las, reduzindo a pasta disponível para a lubrificação interpartículas (Zhang *et al.*, 2021b). Isso

resulta em maior viscosidade e menor fluidez, tornando a mistura mais resistente ao escoamento. Com o aumento do comprimento e da dosagem de cada fibra, a fluidez da pasta de cimento diminui.

Dessa forma, o aumento do teor de fibras pode comprometer a extrudabilidade e a estabilidade geométrica da mistura, exigindo ajustes na dosagem de aditivos superplastificantes. Assim, a definição de um teor ótimo de fibras torna-se fundamental para equilibrar desempenho reológico e controle da retração (Zat *et al.*, 2025).

## **2.6. Correlação de imagem digital como método para medição de retração plástica no 3DCP**

Os métodos de medição da retração plástica e da fissuração em concretos convencionais moldados vêm sendo desenvolvidos há anos e podem ser classificados, conforme a técnica empregada, em três categorias principais: Transformador Diferencial de Tensão Linear (LVDT), processamento de imagens e sensores a laser, sendo a retração plástica comumente avaliada por meio de correlação de imagem digital (DIC) ou sensores ópticos de fibra distribuída (DOFS) (Zhang *et al.*, 2023). No 3DCP, a DIC é preferida em relação aos equipamentos de medição tradicionais, como os transformadores diferenciais variáveis lineares (LVDTs), devido à sua natureza não intrusiva. A DIC deve ser realizada em ambientes com luz estável e sem vibrações (Moelich; Kruger; Combrinck, 2020). As DOFS têm sido amplamente utilizadas para medir deformações de retração a longo prazo, profundidade de corrosão e alterações de temperatura do concreto endurecido (Lin *et al.*, 2021). À medida que a amostra sofre retração, as DOFS embutidas sofrem deformação. A adesão inadequada das fibras ópticas pode resultar em perda de deformação ou erros. A mudança no comprimento de onda da luz que passa pelas DOFS é usada para calcular as deformações em diferentes posições ao longo das fibras ópticas (Zhang *et al.*, 2023). Semelhante à DIC, as DOFS requerem o uso de equipamentos caros e análise de dados complexa. Além disso, essas fibras ópticas podem ser facilmente quebradas ou danificadas durante a embutimento ou cura. Medições de alta precisão podem ser obtidas com o uso de LVDTs, DIC e DOFS (Els; Van Zijl; De Villiers, 2025).

Na engenharia estrutural, técnicas convencionais de medição por contato, como acelerômetros e extensômetros, apresentam limitações devido à necessidade de cabeamento, arranjos complexos e medições restritas aos pontos dos transdutores (Baqersad *et al.*, 2017). Nesse cenário, as técnicas ópticas sem contato ganham relevância, permitindo medições de campo completo. Entre elas, destacam-se as interferométricas, que avaliam deformações pelo

registro da diferença de fase da luz espalhada, e as não interferométricas, que comparam variações de níveis de cinza, como a Correlação de Imagens Digitais (DIC) (Pan *et al.*, 2009).

O método de DIC foi desenvolvido na década de 1980 na Universidade da Carolina do Sul e ganhou destaque com os avanços em câmeras digitais de baixo custo e alta resolução, capacidade computacional e armazenamento (Schreier; Orteu; Sutton, 2009). A técnica permite medir deslocamentos e deformações de campo completo em diferentes materiais e estruturas, comparando imagens nos estados não deformado e deformado. Baseado em correspondência de padrões, o DIC acompanha o movimento de pixels em regiões de interesse para calcular deslocamentos e deformações (Schreier; Orteu; Sutton, 2009).

Recentemente, técnicas avançadas de análise de imagens, como a correlação de imagens digitais (DIC), foram aplicadas com sucesso na detecção de fissuras induzidas por retração em estruturas à base de cimento, inclusive no 3DCP (Markin; Combrinck; Mechtcherine, 2024; Markin; Mechtcherine, 2023; Markin; Combrinck; Mechtcherine, 2024; Bertelsen *et al.*, 2019).

O método bidimensional de Correlação de Imagens Digitais (2D-DIC) requer apenas uma câmera fixa para registrar as imagens digitais da superfície da amostra durante o processo de deformação. Esse método é utilizado para estimar os deslocamentos e as deformações no plano da superfície da amostra plana. Os deslocamentos de pontos selecionados na superfície são encontrados pela comparação de sub imagens ou subconjuntos das imagens antes e depois da deformação (Siddiqui; Ahmed, 2014).

Diversos alvos são utilizados para garantir que a deformação possa ser reconhecida e monitorada com precisão no método DIC. Por exemplo, podem ser utilizados marcadores com gráficos exclusivos em preto e branco inseridos no 3DPC (Moelich; Kruger; Combrinck, 2020), no qual a medição da retração total se baseia na variação da distância entre esses dois marcadores. Pode ser usado também tinta spray à base de giz, aplicada em preto e branco sobre o concreto para criar um padrão pontilhado de tamanho adequado. Bertelsen *et al.* (2019) demonstraram que o uso da tinta não influencia a taxa de evaporação da argamassa fresca e, portanto, não afeta os resultados dos ensaios de retração plástica.

A Tabela 1 apresenta uma comparação de resultados obtidos por diferentes autores empregando DIC para monitoramento das deformações de retração plástica nas primeiras horas após a impressão. As condições de cura, o tamanho da amostra, o teor de ligante e água/cimento influenciam diretamente na retração plástica. Esses parâmetros interferem na taxa de evaporação de água.

Tabela 1 – Deformações de retração plástica relatadas em 3DPC

Estudo	Condições de cura	Amostra (mm)	Areia/ligante	a/c	Método	Tempo zero (t <sub>0</sub> )	Duração (horas)	Retração (mm/m)
(Markin; Mechtcherine, 2023)	30 ± 2 °C; UR 40 ± 2 %; V = 5 ± 0,3 m/s	100 × 75 × 500	1,82	0,51	DIC	1 h	3,3	min.: 0,14 máx.: 0,87
Han <i>et al.</i> , (2023)	20 ± 1 °C; UR 60 ± 2 %; V = 3,5 m/s	60 × 80 × 250	1	0,36	DIC	0,33 h	2,4	min.: 6,0 máx.: 11,0
Moelich; Kruger; Combrinck, (2020)	25 ± 1 °C; UR 60 ± 5 %; V = 3,6 m/s	L1 = 200 L2 = 300	1,4	0,45	DIC	0,2 h	2,4	min.: 5,0 máx.: 7,0

UR = umidade relativa; V = velocidade do vento; a/c = água/cimento

Fonte: autoria própria (2026)

Observa-se que as condições ambientais de cura, as dimensões das amostras e as proporções da mistura (especialmente as relações areia/ligante e água/cimento) exercem influência significativa sobre a magnitude da retração.

A literatura relata soluções inovadoras para criar superfícies praticamente sem atrito com o objetivo de medir a retração plástica livre de corpos de prova impressos. Quando a retração ocorre sem impedimentos, obtém-se uma condição de retração livre ou irrestrita. Markin, Combrinck e Mechtcherine (2023), desenvolveram uma interface de baixo atrito com folhas de polietileno e óleo para medir a retração plástica livre, utilizando amostras de 100 × 75 × 500 mm. O estudo utilizou uma relação areia/ligante = 1,82 e apresentou os menores valores de retração (0,14 a 0,87 mm/m), dentre os estudos comparados na Tabela 1, mesmo sob condições de maior temperatura e menor umidade relativa, que favorecem a evaporação. Em contraste, estudos com menores relações areia/ligante, como Han *et al.* (2023), registraram retrações significativamente superior (6,0 a 11,0 mm/m). Resultados intermediários foram observados por Moelich, Kruger e Combrinck (2020), com relação areia/ligante = 1,4 e retração entre 5,0 e 7,0 mm/m.

Esses dados sugerem que o aumento do teor de agregados em relação ao ligante contribui para a redução da retração plástica, possivelmente devido à menor fração de pasta suscetível à contração e ao maior efeito de restrição promovido pelos agregados. Além disso, deve-se levar em conta o tamanho das amostras e o tempo de início de ensaio, pois as deformações por retração plástica começam a se desenvolver logo após a impressão.

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Materiais

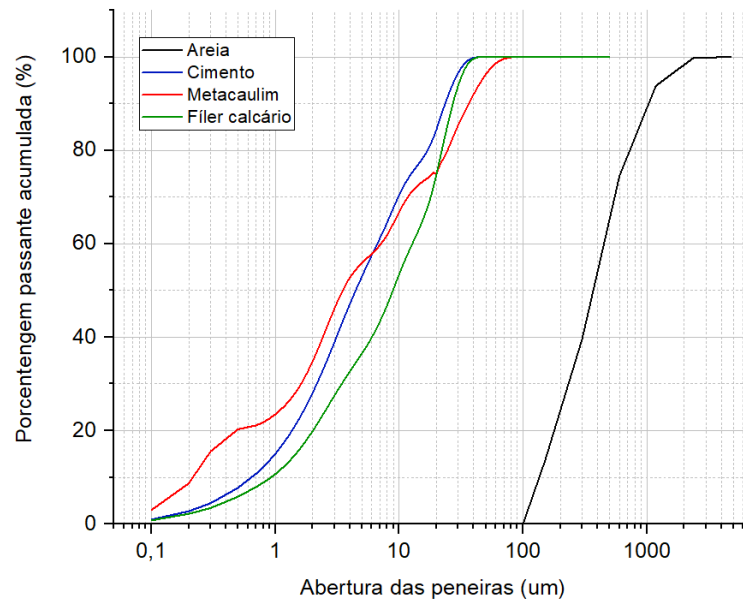
Para a produção das misturas destinadas à impressão 3D de concreto (3DCP), foram utilizados cimento Portland de alta resistência inicial (CP-V), metacaulim comercial (MK) e filer calcário (FC) com partículas passantes na peneira de 200 mesh (dimensão < 0,074 mm). A fase granular foi composta por areia de rio, com tamanho máximo de partícula de 2,36 mm e teor de material pulverulento de 3,34%. A distribuição granulométrica da areia foi determinada por meio de análise granulométrica por peneiramento, conforme a NBR 17054, utilizando peneiras com aberturas de 4,75 mm, 2,36 mm, 1,18 mm, 0,60 mm, 0,30 mm, 0,15 mm e 0,075 mm. Para avaliar a retração plástica, foram utilizadas misturas com e sem a incorporação de fibras de polipropileno (PP). As fibras apresentam densidade de 0,91 g/cm<sup>3</sup> e comprimentos de 12 mm (diâmetro de 35 µm) e 6 mm (diâmetro de 18 µm), ambas possuem fator de forma igual a 0,34, parâmetro que expressa a relação geométrica da fibra e está diretamente associado à sua capacidade de ancoragem na matriz cimentícia. A Tabela 2 e a Figura 5, apresentam a distribuição granulométrica dos materiais utilizados e as suas caracterizações físicas. A fim de garantir fluidez, coesão, viscosidade e capacidade de retenção de água adequadas ao processo de impressão, foram empregados um aditivo superplastificante à base de policarboxilato (SP) e um modificador de viscosidade à base de hidroxipropil metilcelulose (HPMC). A água utilizada foi proveniente da concessionária local. A seleção e a combinação desses materiais tiveram como objetivo otimizar o desempenho reológico das misturas, reduzir o consumo de cimento e atender às exigências específicas do processo de impressão 3D.

Tabela 2 – Caracterização física dos materiais

Propriedade	Material	Norma	Valor
Diâmetro médio da partícula (µm)	Cimento	-	8,51
	Metacaulim	-	11,77
	Fíler calcário	-	11,91
Área superficial BET(m <sup>2</sup> /g)	Cimento	-	1,70
	Metacaulim	-	23,00
	Fíler calcário	-	2,75
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Cimento	ABNT NBR 16605:2017	3,13
	Metacaulim	ABNT NBR 16605:2017	2,53
	Fíler calcário	ABNT NBR 16605:2017	2,88
	Areia	ABNT NBR 16916:2021	2,36
Teor de material pulverulento (%)	Areia	ABNT NBR 16973:2021	3,34

Fonte: autoria própria (2026)

Figura 5 – Caracterização física dos materiais



Fonte: autoria própria (2026)

### 3.2. Preparação das misturas e procedimento de impressão

As misturas estudadas foram elaboradas com base em um traço de referência, utilizando proporções, em massa, cimento:areia de 1:2 e 1:3. A partir de cada mistura de referência, foi realizada a substituição parcial do cimento Portland, em volume, por filer calcário (FC) e metacaulim (MK). Em ambas as proporções, adotou-se a substituição simultânea de 50% de filer calcário e 10% de metacaulim, totalizando 60% de substituição do cimento. Essa composição foi definida com base na metodologia de dosagem proposta por Barbosa *et al.* (2022) e Medeiros *et al.* (2025). Nunes *et al.* (2023) investigou a formulação com 40% de filer e 10% de metacaulim, demonstrando boa extrudabilidade e propriedades mecânicas. A presente pesquisa avança nessa linha ao adotar a formulação 50% de filer e 10% de metacaulim, visando reduzir ainda mais o consumo de cimento e, conseqüentemente, o impacto ambiental associado, mantendo o desempenho adequado para aplicação em 3DCP. As misturas com adições minerais foram denominadas FM12 e FM13, correspondentes, respectivamente, aos traços 1:2 e 1:3. Além disso, em cada traço contendo adições minerais, foram incorporadas fibras de polipropileno (PP) em teor correspondente a 0,5% do volume total da argamassa, utilizando-se fibras com comprimentos de 6 mm e 12 mm. As misturas com fibras foram denominadas FM12PP6 e FM12PP12, para o traço com proporção cimento:areia 1:2, e FM13PP6 e FM13PP12, para o traço 1:3. As composições são apresentadas na Tabela 3. Ressalta-se que todas as misturas, com e sem fibras, mantiveram constante a relação água/materiais secos

(a/ms), fixada em 12%, permitindo a comparação entre os diferentes traços quanto à demanda hídrica para o umedecimento dos materiais.

O aditivo HPMC foi mantido constante a uma taxa de 0,15% em relação a massa dos ligantes (CP + FC + MK). Enquanto o teor de superplastificante (SP) foi ajustado para cada mistura de forma a garantir a extrudabilidade adequada, evitando o entupimento do bico da extrusora durante a impressão. A dosagem de SP foi definida de modo a assegurar que todas as misturas apresentassem espalhamento entre  $200 \pm 15$  mm no ensaio de mesa de consistência, intervalo recomendado por estudos anteriores que utilizaram o mesmo sistema robótico de pórtico empregado neste trabalho (Barbosa *et al.*, 2022; Dias *et al.*, 2024; Medeiros *et al.*, 2025; Nunes *et al.*, 2023).

Tabela 3 - Composição das misturas 3DCP

Misturas	CP-V (kg/m <sup>3</sup> )	FC (kg/m <sup>3</sup> )	MK (kg/m <sup>3</sup> )	Areia (kg/m <sup>3</sup> )	Água (kg/m <sup>3</sup> )	SP (%)	HPMC (%)	Fibras (kg/m <sup>3</sup> )	VP (l/m <sup>3</sup> )	a/c (kg/kg)
<b>REF12</b>	674,23	-	-	1348,47	242,72	0,5	0,15	-	457,92	0,36
<b>FM12</b>	269,69	309,67	55,95	1348,47	242,72	0,7	0,15	-	457,92	0,9
<b>REF13</b>	498,71	-	-	1496,14	239,38	0,4	0,15	-	398,55	0,48
<b>FM13</b>	199,48	229,06	41,38	1496,14	239,38	0,7	0,15	-	398,55	1,2
<b>FM12PP12</b>	268,35	308,12	55,67	1341,73	241,51	0,9	0,15	4,53	455,63	0,9
<b>FM12PP6</b>	268,35	308,12	55,67	1341,73	241,51	1	0,15	4,53	455,63	0,9
<b>FM13PP12</b>	198,49	227,91	41,18	1488,66	238,18	1,2	0,15	4,53	396,56	1,2
<b>FM13PP6</b>	198,49	227,91	41,18	1488,66	238,18	1,5	0,15	4,53	396,56	1,2

a/c = água/cimento, VP = Volume de pasta, pasta = CP-V + FC + MK

Fonte: autoria própria (2026)

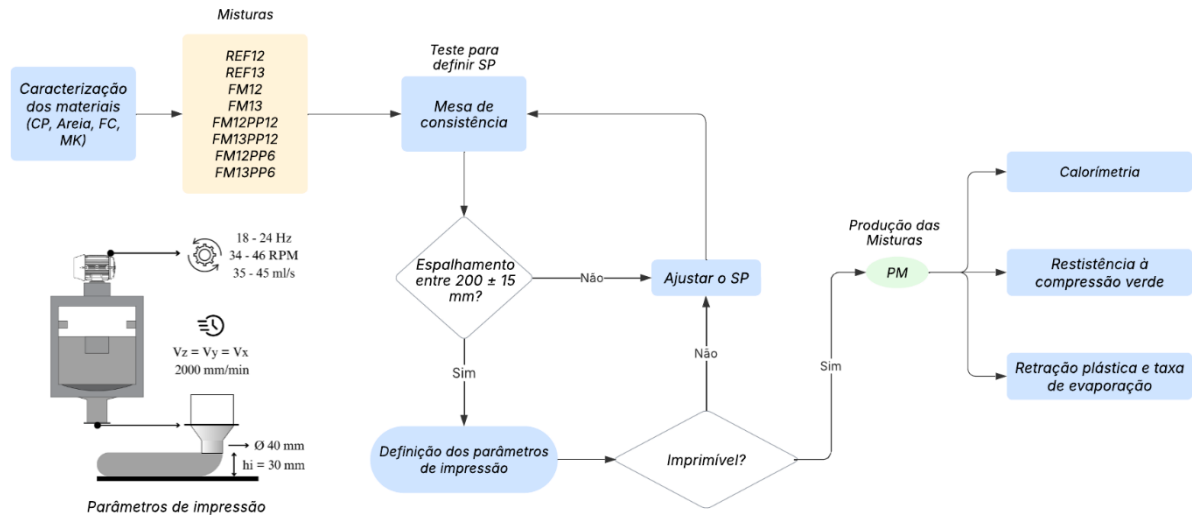
As misturas contendo fibras apresentaram maior demanda de SP e maior espalhamento, a fim de manter a extrudabilidade do material. Esse comportamento está associado ao uso de fibras, que eleva a demanda de água e aditivo para alcançar a fluidez e a extrudabilidade necessárias ao compósito para impressão 3D (Ma *et al.*, 2019; Medeiros *et al.*, 2025).

Para a produção das peças, utilizou-se uma impressora 3D de concreto do tipo pórtico, com dimensões de 1000 mm × 1000 mm × 1500 mm nos eixos X, Y e Z, respectivamente. A impressão foi realizada com velocidade constante de 2000 mm/min e taxa de extrusão variando entre 35 e 45 mL/s. O bico extrusor empregado tem diâmetro de 40 mm, enquanto a altura de deposição foi fixada em 30 mm. A velocidade de rotação do sistema de extrusão foi mantida entre 34 e 46 rpm, com frequência entre 18 e 24 Hz, conforme ilustrado nos parâmetros de impressão na Figura 6.

As misturas foram preparadas em um misturador de eixo inclinado, adotando a metodologia de Medeiros *et al.*, (2025). Com tempo de 2 minutos para cada etapa de mistura, a sequência utilizada consistiu em: homogeneização dos materiais secos; adição de 80% da

água de amassamento; incorporação dos 20% de água restantes juntamente com o superplastificante; adição das fibras, quando aplicável; incorporação do fíler calcário; adição do metacaulim; e, por fim, adição do aditivo HPMC.

Figura 6 – Fluxograma do programa experimental



Fonte: autoria própria (2026)

### 3.3. Calorimetria

A Figura 7 ilustra o equipamento usado para ensaio de calorimetria. O ensaio foi realizado em calorímetro semiadiabático, utilizando-se um *data logger* para a medição da temperatura por meio de termopares, programado para registrar a evolução térmica associada ao calor de hidratação das amostras em intervalos de um minuto. As misturas foram inseridas no equipamento e mantidas em ambiente climatizado, com temperatura controlada de  $20 \pm 2$  °C, durante 72 horas de ensaio.

Figura 7 – Calorímetro



Fonte: autoria própria (2026)

### 3.4. Resistência à compressão verde

Para avaliar a resistência à compressão verde das misturas durante o processo de impressão, foram impressas amostras de 100 mm de comprimento e 60 mm de largura, composta por três camadas. Para cada mistura em análise foram impressas 14 amostras, totalizando 112 amostras, para serem analisadas imediatamente após a impressão e após 15, 30, 60, 90 e 120 minutos após a impressão. O ensaio de resistência verde foi realizado com velocidade constante de deslocamento do travessão do equipamento de 0,1 mm/s, controlado por um motor de passo e dinamômetro (Figura 8).

As leituras de carga são registradas em tempo real, enquanto o deslocamento é monitorado em pontos específicos da amostra por meio da correlação de imagem digital 2D (2D-DIC), utilizando uma câmera digital modelo Canon 550D equipada com lente de distância focal de 50 mm. Os ensaios de resistência verde ocorrem em diferentes intervalos de tempo, sendo a primeira medição feita imediatamente após a impressão e as outras em 15, 30, 60, 90 e 120 minutos após a impressão.

Figura 8 – Teste de resistência à compressão verde



Fonte: autoria própria (2026)

### 3.5. Retração plástica e taxa de evaporação

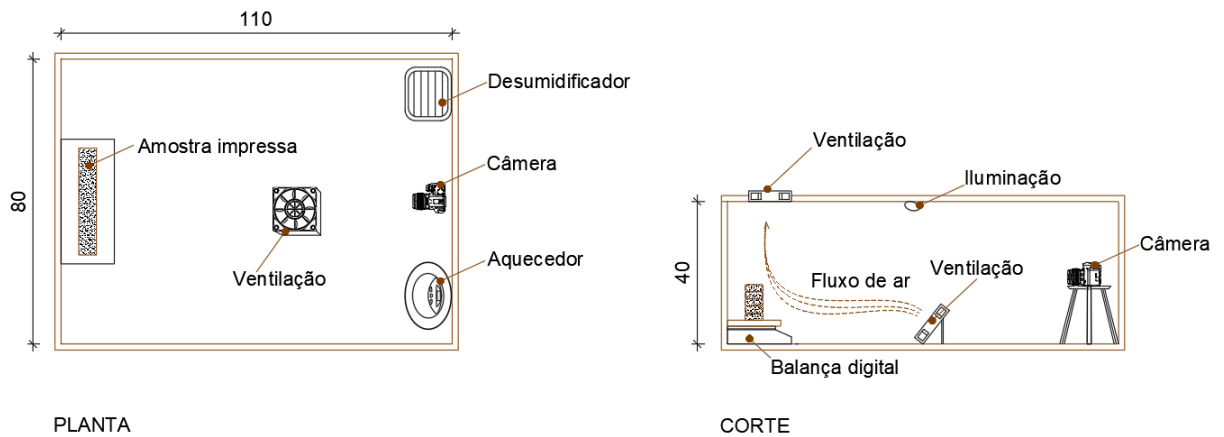
Para a retração plástica, foi utilizada a técnica de Correlação de Imagem Digital em 2D (2D-DIC). Esse método de medição sem contato captura uma série de imagens ao longo do tempo e correlaciona as diferenças entre elas, permitindo monitorar o deslocamento de alvos de alto contraste, nesse caso foram utilizados marcadores nas amostras impressas. As amostras foram impressas com dimensões de 30 cm de comprimento, 16 cm de altura e 6 cm de largura, sobre uma base de madeira com superfície plastificada. Para minimizar restrições ao deslocamento e permitir a livre deformação durante o ensaio, foi aplicada uma fina camada de óleo na base.

O ensaio foi conduzido em uma câmara climatizada, com controle preciso de temperatura e umidade, a fim de garantir a confiabilidade dos resultados, como mostram as Figura 9 e Figura 10. As condições ambientais foram mantidas com uma umidade relativa de  $44\% \pm 3\%$  e uma temperatura do ar de  $31^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . Dois ventiladores foram utilizados para gerar uma velocidade de vento uniforme de 14,4 km/h, que segundo a ACI (2014), essas condições de evaporação resultam em uma taxa de evaporação próxima a  $0,450 \text{ kg/m}^2/\text{h}$ . A aquisição de imagens foi realizada com intervalos de 3 minutos, durante um total de 3 horas de ensaio. A primeira imagem foi capturada aos 60 minutos após a adição da água à mistura, permitindo o tempo necessário para a impressão e a preparação do ensaio. O ensaio foi realizado em duplicata.

Uma câmera de modelo Canon 80d, com uma distância focal da lente de 35 mm, estando a 850 mm da amostra foi utilizada para captura das imagens. Para este ensaio, optou-se por utilizar marcadores de alto contraste para captar a deformação, compostos por um adesivo preto e um alfinete branco, formando um círculo externo preto de 6 mm e um círculo interno de 3 mm de diâmetro, como mostra a Figura 11.

A escala espacial das imagens foi definida por meio de calibração bidimensional no software Zeiss Inspect Correlate, utilizando uma régua metálica posicionada no mesmo plano da amostra. Cada imagem de  $6000 \times 4000$  pixels possui um tamanho de pixel de  $0,08 \times 0,08$  mm. Isso resulta em um diâmetro aproximado de 75 pixels cobrindo a elipse sobre cada ponto do marcador.

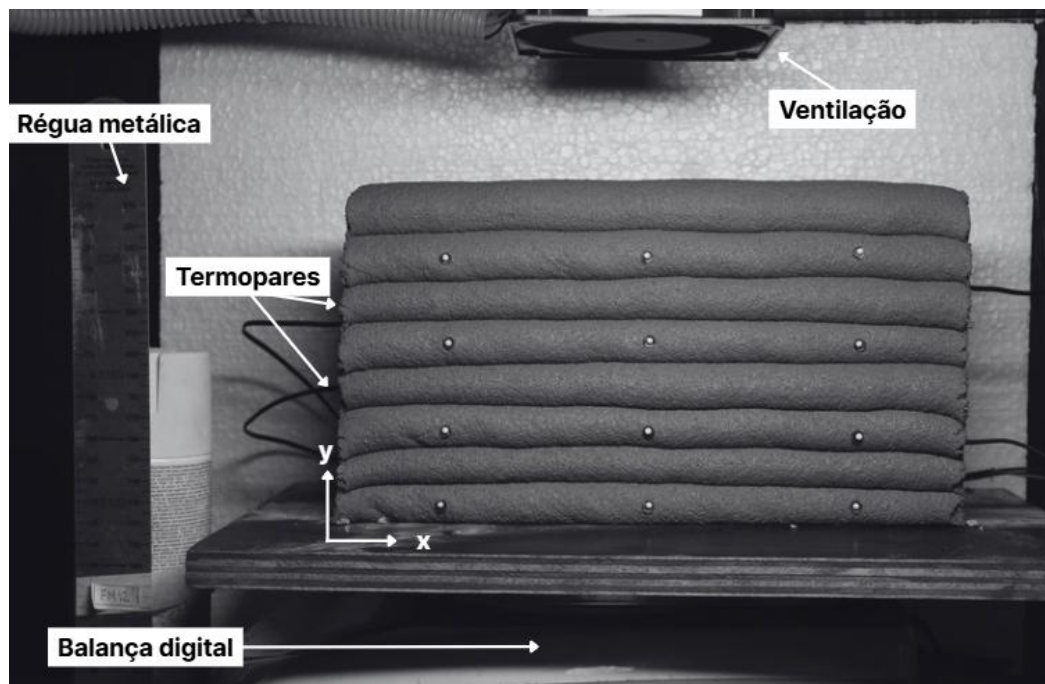
Figura 9 – Diagrama do setup da câmara climatizada



Fonte: autoria própria (2026)

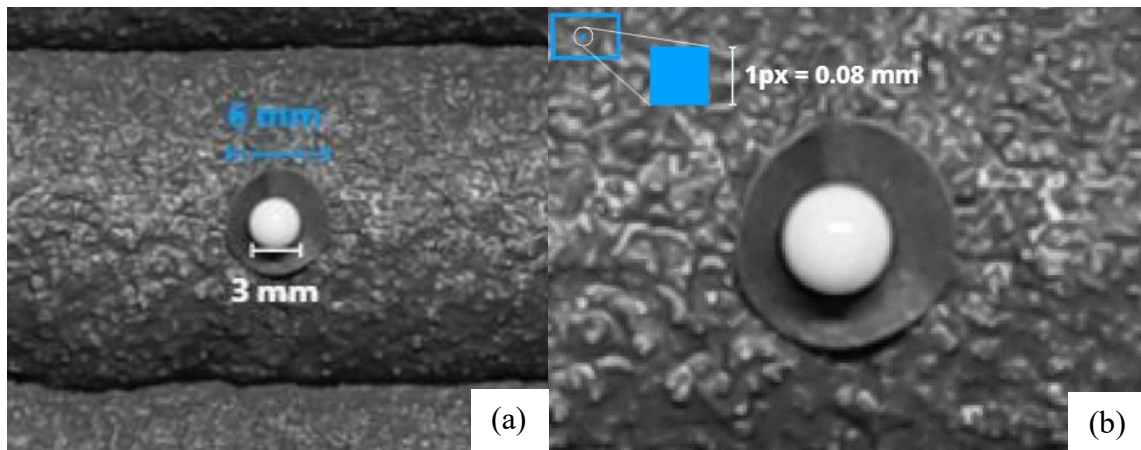
As imagens foram analisadas através do software Zeiss Inspect Correlate, a fim de determinar as deformações devido a retração plástica. Além disso, foram implementados sistemas de iluminação de led difusa, termopares para monitoramento da temperatura, ventilação controlada e uma balança com resolução de 0,1 g para medir a taxa de evaporação, garantindo condições uniformes e padronizadas ao longo de todo o experimento. Essas medidas garantem a repetibilidade dos testes e a obtenção de dados mais confiáveis para a análise da retração plástica do concreto.

Figura 10 – Amostra impressa dentro da câmara climatizada



Fonte: autoria própria (2026)

Figura 11 – Marcadores DIC (a) e resolução de pixel (b)



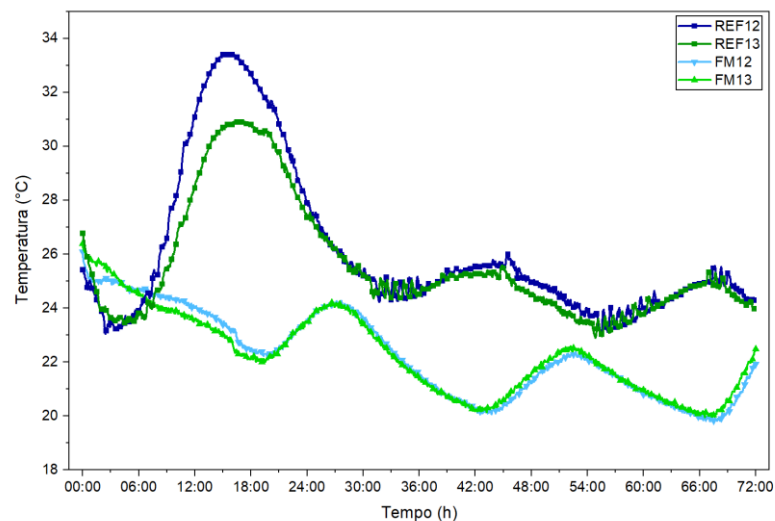
Fonte: autoria própria (2026)

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Calorimetria

A Figura 12 apresenta a evolução da temperatura ao longo das primeiras 72 horas para quatro misturas: REF12, REF13, FM12 e FM13. Observa-se que as misturas de referência, com maiores teores de cimento, apresentaram os maiores picos de temperatura, especialmente entre aproximadamente 10 e 20 horas. Esse comportamento indica uma maior taxa de liberação de calor, coerente com o maior conteúdo de clínquer disponível para hidratação. Além disso, o cimento utilizado tem como característica o elevado teor de  $C_3S$ , crucial para a resistência inicial do material, liberando calor na hidratação em poucas horas.

Figura 12 – Calorimetria das misturas



Fonte: autoria própria (2026)

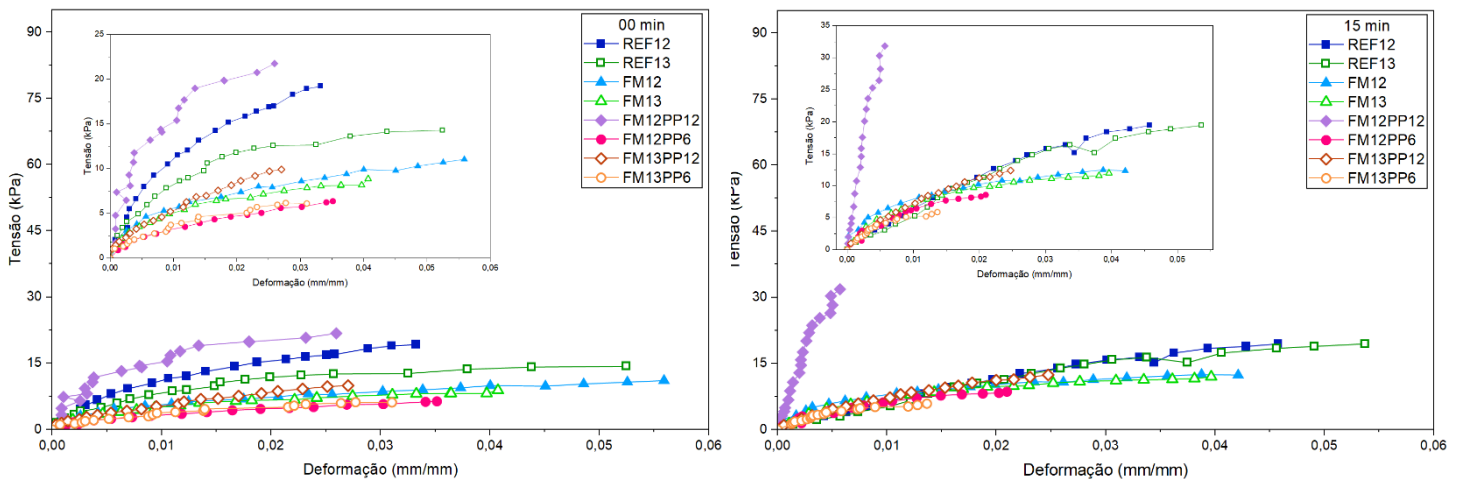
As misturas FM12 e FM13, contendo substituição parcial do cimento por fíler calcário e metacaulim, apresentaram picos de temperatura significativamente menores e mais suaves, evidenciando uma redução da intensidade da reação exotérmica inicial.

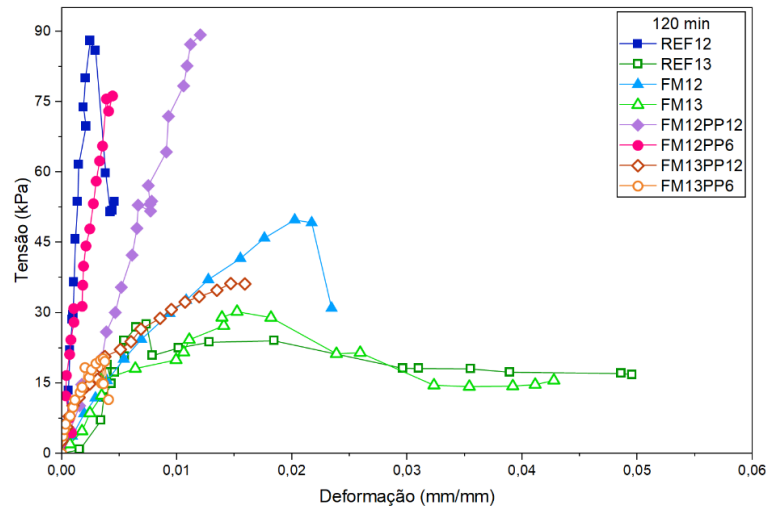
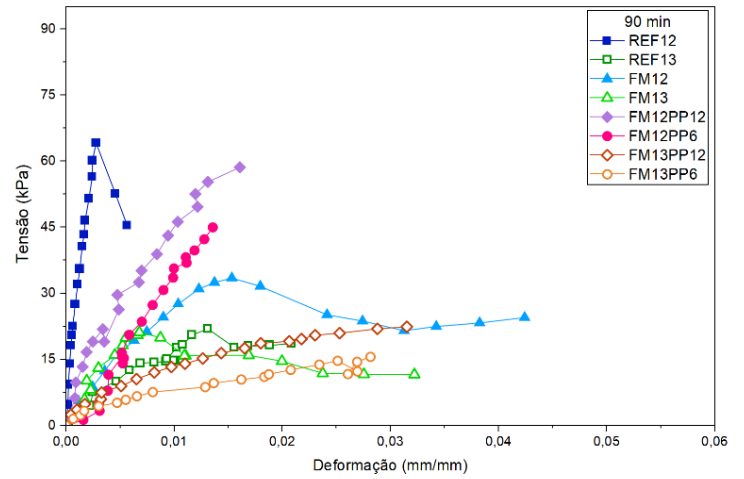
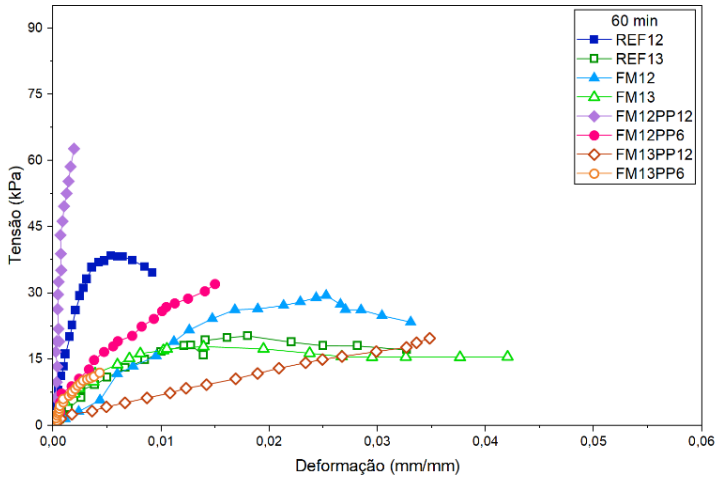
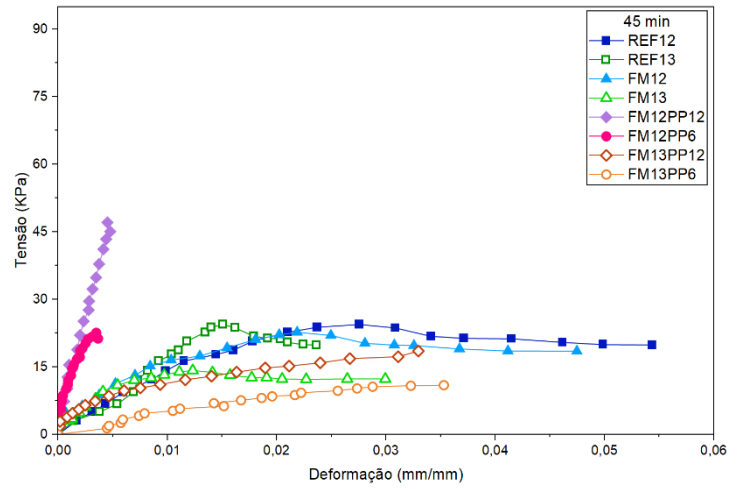
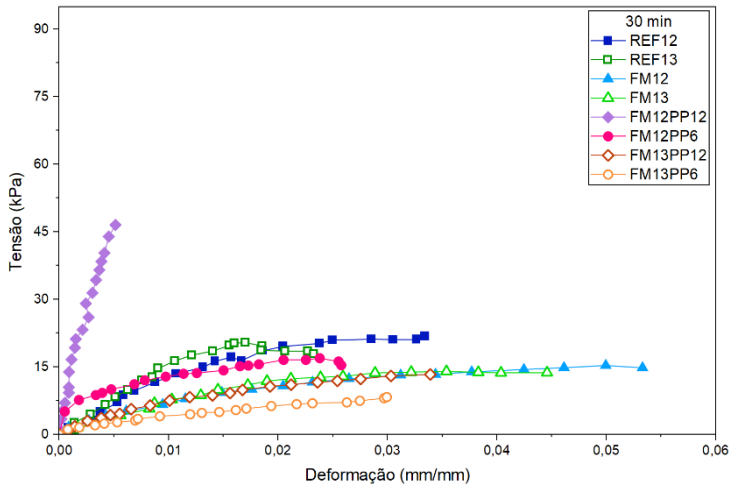
#### 4.2. Resistência à compressão verde

A Figura 13 apresenta as curvas tensão versus deformação das misturas cimentícias impressas nas condições reais do sistema de impressão.

Observa-se que até o tempo T15 as misturas com adições minerais suportam menores tensões em comparação com as misturas apenas com cimento, REF12 e REF13 nos primeiros minutos de ensaio. Isto está relacionado com o volume de pasta, teor de SP, teor de agregado das misturas e adição mineral, entre as misturas 12 e 13, por exemplo, uma tensão de 10 kPa gera maiores deformações nas misturas com menor volume de pasta, maior teor de água, maior teor de SP e maior teor de adição mineral. A exceção é a mistura FM12PP12, que apresenta maior suporte de carga e menor deformação, devido a incorporação de fibras com comprimento que trava a deformação da mistura.

Figura 13 – Resistência à compressão verde para os tempos 00, 15, 30, 45, 60, 90 e 120 minutos



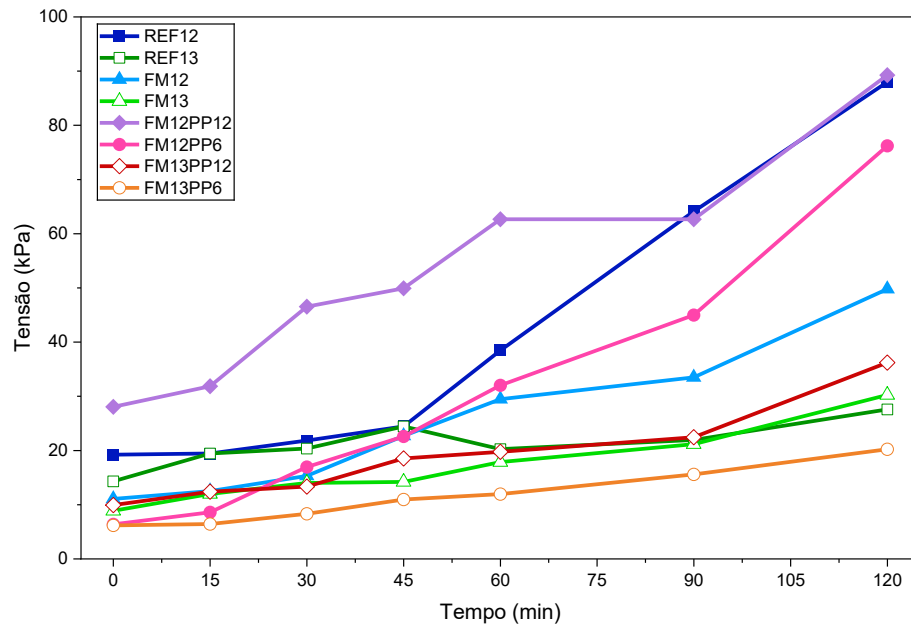


Fonte: autoria própria (2026)

Na Figura 14, a resistência verde de cada teste (definida como a tensão máxima de cada curva versus tempo de ensaio) é representada graficamente. As misturas com proporção 1:2 obtiveram maiores resistências. As misturas apresentam aumento de tensão de compressão com o tempo, com um aumento gradual do módulo de elasticidade no estado fresco. A tensão aumenta aproximadamente de forma linear com o deslocamento vertical, sem apresentar uma fase descendente na curva de tensão versus deformação.

A partir de 30 minutos para as misturas de referência REF12 e REF13 e 60 minutos para as outras misturas, a carga aumenta até atingir um pico e, em seguida, diminui em valor; no entanto, a mistura FM13PP6 só apresentou esse comportamento aos 120 minutos. Essa diferença ocorre porque as misturas REF12 e REF13 têm maior teor de cimento, levando a uma hidratação inicial mais rápida e um desenvolvimento de resistência mais rápido, o que permite que o material atinja o pico de tensão e comece a falhar mais cedo. As outras misturas contêm aditivos minerais (fíler calcário e metacaulim) que retardam o processo de hidratação inicial, atrasando o início do comportamento de pico de tensão para 60 minutos (Hayek; El Bitouri; Yahia, 2025).

Figura 14 – Desenvolvimento da resistência inicial das misturas

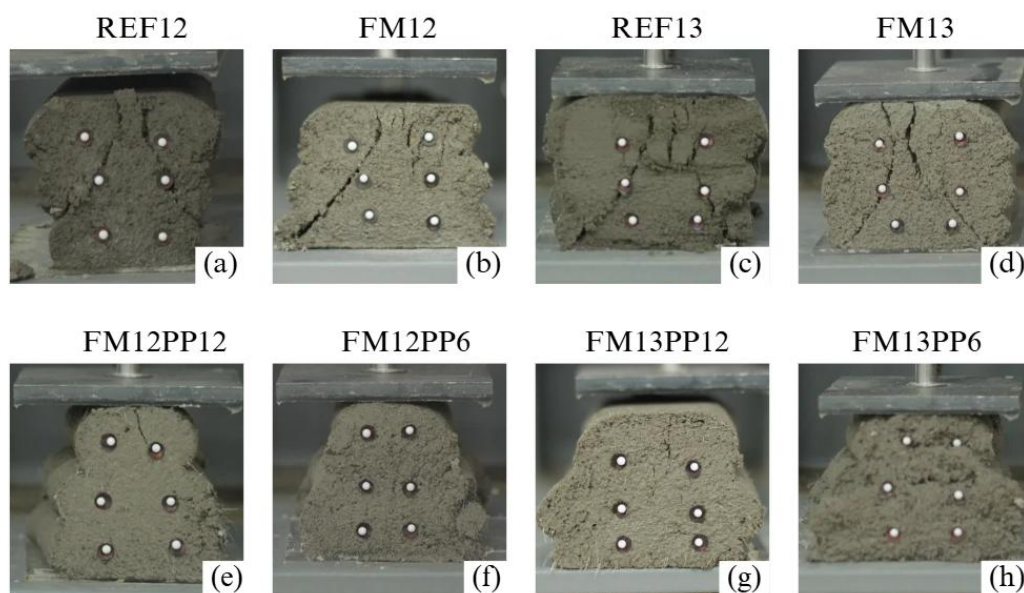


Fonte: autoria própria (2026)

As misturas contendo fibras, exceto a FM12PP12, apresentam a menor resistência em T0, T15 e T30, o que é atribuído ao seu maior teor de superplastificante, tornando-as mais fluidas para extrusão. Aos 120 minutos, a mistura FM12PP6 não apresentou fissuras ou falhas

de cisalhamento evidentes, o que se reflete na ausência de um pico de tensão bem definido na sua curva de tensão-deformação, indicando que a amostra ainda poderia suportar mais carga. Conforme mostrado na Figura 15, os modos de ruptura são evidentes nas misturas sem fibras, com falha por cisalhamento, formação de fissuras e redução da resistência à compressão após o pico de tensão. Enquanto isso, as amostras contendo fibras não apresentaram deformação excessiva ou fissuras. Isso ocorre porque as fibras de polipropileno fornecem um mecanismo de ponte (*bridging*) de fissuras que interrompe a propagação das fissuras e redistribui as tensões por toda a matriz cimentícia, transformando o modo de falha de frágil para dúctil e mantendo a integridade estrutural mesmo após atingir o pico de tensão.

Figura 15 – Padrões de ruptura nos corpos de prova cimentícios impressos em 3D testados no estado fresco aos 120 minutos de ensaio: (a–d) misturas sem fibras de PP e (e–h) misturas com fibras de PP.



Fonte: autoria própria (2026)

### 4.3. Perda de água, taxa de evaporação e retração plástica

A Figura 16 ilustra as amostras impressas dentro da câmara climatizada, logo após o início do ensaio de retração plástica. Já na Figura 17 é ilustrada a perda total de água, obtida a partir da média de duas amostras de teste no ensaio de retração plástica, em função da área total exposta da amostra impressa. A taxa de evaporação da água está relacionada a fatores internos e externos às misturas. Como os fatores externos neste ensaio foram controlados, ou seja, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, calor radiante e superfície exposta foram os mesmos para todas as misturas, é evidente que a composição das misturas é decisiva na taxa de evaporação.

Figura 16 – Amostras impressas



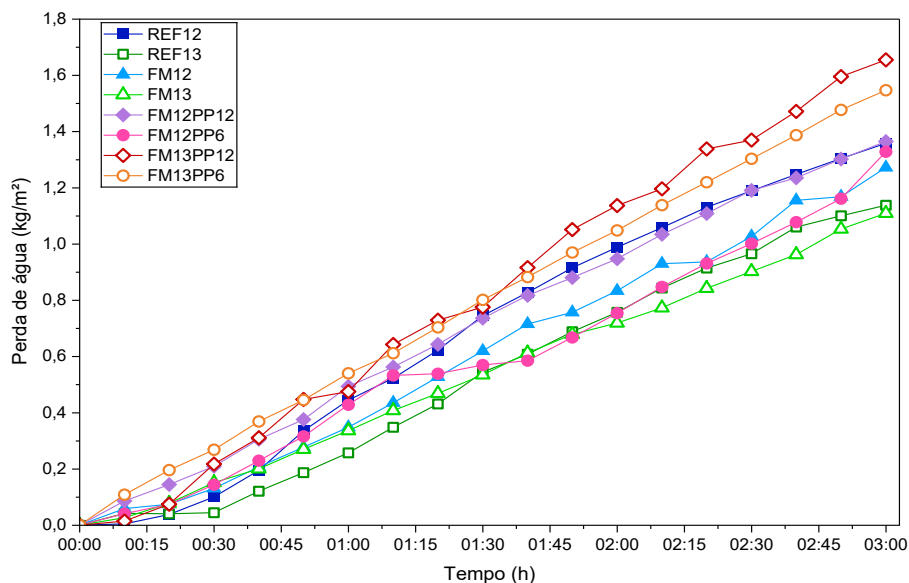
Fonte: autoria própria (2026)

Ao analisar a perda de água nas misturas sem fibras, na Figura 17, pode-se observar que a REF12 apresentou a maior perda de água ( $1,36 \text{ kg/m}^2$ ), seguida pela FM12 ( $1,27 \text{ kg/m}^2$ ), e a menor perda foi encontrada nas misturas REF13 e FM13, com valores de aproximadamente  $1,10 \text{ kg/m}^2$ , fato relacionado ao maior volume de pasta ( $V_p$ ) nas misturas REF12 e FM12, com  $457,92 \text{ L/m}^3$ , em comparação com  $398,55 \text{ L/m}^3$  nas misturas REF13 e FM13. Assim, a evaporação nas misturas 3DCP também é influenciada pela composição da pasta, onde se observa que a substituição do cimento Portland por MK e enchimento de calcário reduziu a taxa de evaporação devido à maior área superficial do MK e ao melhor empacotamento granular das misturas FM12 e FM13 em comparação com REF12 e REF13. O teor da pasta foi mais importante neste ensaio do que a composição da pasta, uma vez que as misturas REF13 e FM13 têm praticamente a mesma taxa de evaporação, assim como as misturas REF12 e FM12.

As misturas cimentícias para impressão 3D com fibras tendem a reduzir a bombeabilidade e a extrudibilidade, com uma tendência para as fibras se aglomerarem. Para permitir a impressão adequada de misturas contendo fibras à mesma taxa de extrusão que as misturas sem fibras, as misturas com fibras foram ajustadas aumentando o teor de SP.

A relação  $w/c$  controla a quantidade de água a ser evaporada, enquanto a inclusão de fibras resultou em uma taxa de evaporação mais alta, que foi maior para as misturas FM13PP12 ( $1,66 \text{ kg/m}^2$ ) e FM13PP6 ( $1,52 \text{ kg/m}^2$ ), seguidas pelas misturas FM12PP12 e FM12PP6, com uma taxa de evaporação de  $1,32 \text{ kg/m}^2$ , um fato associado à maior relação água/cimento das misturas FM13PP12 e FM13PP6, necessária para permitir a extrusão e impressão adequadas das camadas.

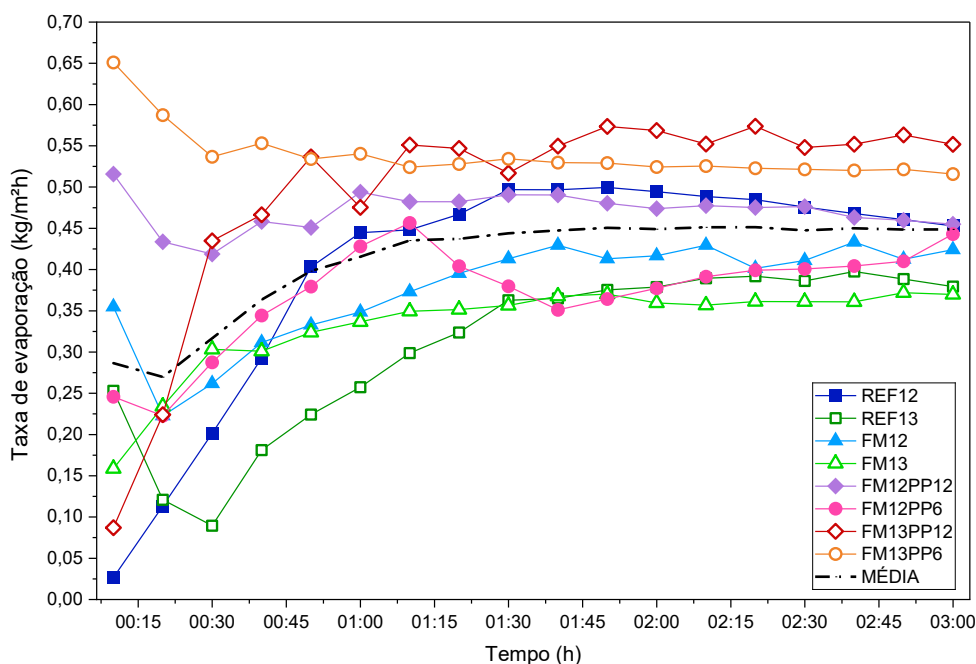
Figura 17 – Perda de água em relação a superfície exposta



Fonte: autoria própria (2026)

A Figura 18 mostra a taxa de evaporação, que é afetada por vários fatores, incluindo condições ambientais externas, relação superfície/volume e características inerentes ao material (Markin *et al.*, 2024). A taxa de evaporação da água influencia o encolhimento plástico do betão impresso em 3D (3DPC), uma vez que Moelich, Kruger and Combrinck (2020) demonstraram que uma taxa de evaporação moderada ( $0,45 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ ) pode levar a uma perda de aproximadamente 24% da água na mistura nas primeiras duas horas, aumentando tanto a taxa quanto o valor máximo de retração plástica do material. As misturas FM13PP12, FM13PP6, REF12 e FM12PP12 apresentaram taxas superiores a  $0,45 \text{ kg/m}^2\cdot\text{h}$ , o que pode refletir a uma elevada retração plástica.

Em relação ao tamanho das fibras, as misturas com fibras de 12 mm apresentaram maior perda de água do que as misturas com fibras de 6 mm. A presença de fibras no concreto fresco altera a microestrutura ao seu redor, criando uma zona de transição com maior porosidade e espaços preenchidos com água (Da Silva Neto *et al.*, 2025). A incorporação de fibras em compósitos cimentícios pode aumentar a porosidade e a formação de canais, facilitando o transporte de água para a matriz (Lei *et al.*, 2019).

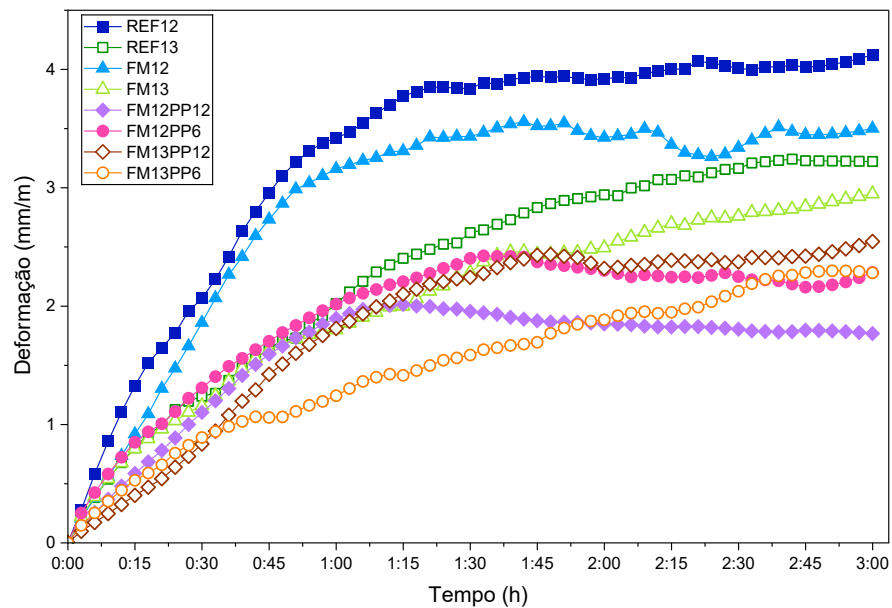
Figura 18 – Taxa de evaporação (kg/m<sup>2</sup>h)

Fonte: autoria própria (2026)

A Figura 19 mostra as deformações plásticas de retração na direção longitudinal. Em geral, em misturas sem fibras, a evolução da retração plástica acompanhou diretamente a perda de água ao longo do ensaio, indicando que o mecanismo dominante foi a evaporação e a redistribuição da água nas fases iniciais. Além disso, em amostras sem fibras, para a mesma relação cimento/agregado e volume de pasta, a incorporação de aditivos minerais resultou em valores de retração mais baixos do que nas misturas de referência. Misturas com volumes mais elevados de pasta e cimento (série 12) apresentaram níveis de retração mais elevados do que as misturas da série 13, independentemente da presença de aditivos minerais.

Além disso, em amostras sem fibras, para a mesma relação cimento/agregado e volume de pasta, a incorporação de aditivos minerais resultou em valores de retração mais baixos do que nas misturas de referência. Misturas com volumes mais elevados de pasta e cimento (série 12) apresentaram níveis de retração mais elevados do que as misturas da série 13, independentemente da presença de aditivos minerais. As misturas com maior teor de cimento apresentaram os maiores valores de deformação devido ao encolhimento plástico, com rápido crescimento nas primeiras horas e tendência a estabilizar aproximadamente 1 hora após o início do ensaio. Este comportamento indica maior suscetibilidade à perda de água e redução volumétrica no estado fresco.

Figura 19 – Retração plástica



Fonte: autoria própria (2026)

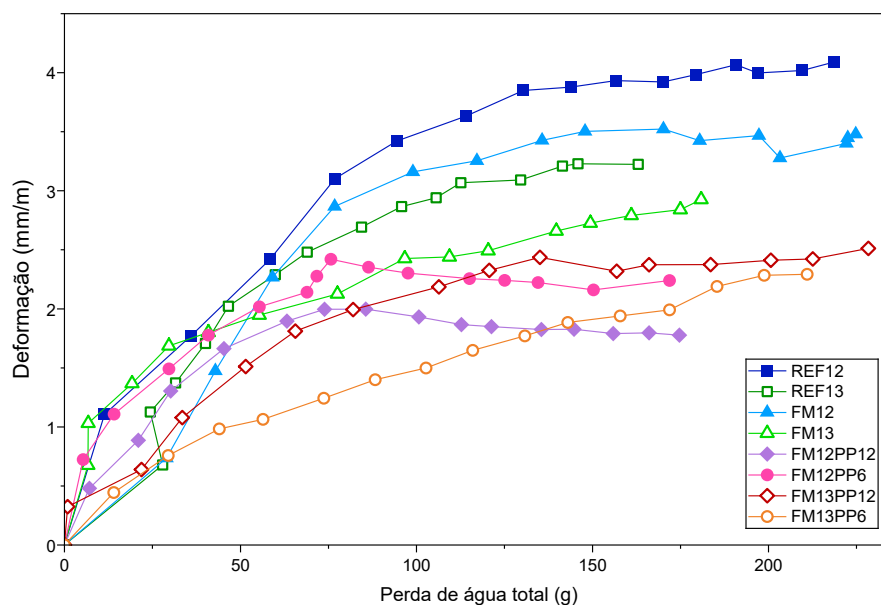
Em relação às misturas com fibras, FM13PP12 e FM13PP6 apresentaram maior deformação ao longo do ensaio, o que pode ser atribuído à maior relação água/cimento e à maior perda de água observada. Mesmo assim, a deformação final desta mistura foi menor do que a das misturas sem fibras, destacando o papel das fibras na redistribuição de tensões e no controle da deformação total.

A mistura FM12PP12 exibiu comportamento semelhante a outras misturas durante a fase inicial, mas demonstrou maior eficiência no controle da deformação após aproximadamente uma hora de teste. Isso é evidenciado por uma redução na inclinação da curva ao longo do tempo e uma menor deformação final, indicando melhor desempenho das fibras na limitação da evolução da retração plástica. Um fenômeno semelhante foi observado na mistura FM12PP6, que contém fibras mais curtas; no entanto, esta mistura apresentou maior deformação total do que a mistura com fibras de 12 mm. Esta constatação demonstra que o comprimento da fibra influencia diretamente o controle da retração plástica, sendo as fibras mais longas mais eficazes na restrição da propagação da deformação ao longo do tempo.

A mistura FM12PP12 alcançou uma redução de 57,27% na retração plástica em comparação com a REF12. Entretanto, considerando os aspectos visuais das amostras, a mistura FM12PP6 obteve melhor desempenho em relação a extrudabilidade e maior uniformidade das camadas, sem apresentar irregularidades, além de apresentar uma redução de 44,59 % na retração plástica em comparação com a REF12. A Figura 20 evidencia a relação entre a perda de água e a retração plástica. Pode-se observar que as misturas sem fibras e com maior teor de

pasta (série 12), obtiveram as maiores retrações plásticas. Enquanto nas misturas com fibras a maior perda de água e maior retração está relacionada a maior relação a/c nas misturas (FM13PP12 e FM13PP6).

Figura 20 – Retração plástica em relação à perda de água



Fonte: autoria própria (2026)

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou o comportamento inicial de misturas cimentícias impressas em 3D, com foco nos efeitos das adições minerais (fíler calcário e metacaulim), reforço com fibra de polipropileno, volume da pasta e composição da mistura na evolução do calor de hidratação, resistência à compressão verde, evaporação da água e retração plástica. Com base nos resultados experimentais, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- A redução na intensidade das reações exotérmicas em misturas com substituição parcial do cimento por SCMs influenciou diretamente o tempo de desenvolvimento do pico de tensão nos ensaios de resistência verde: as misturas de referência atingiram o pico de tensão aos 30 minutos, enquanto as misturas com adições minerais levaram 60 minutos e a mistura reforçada com fibras FM13PP6 atingiu o pico apenas aos 120 minutos. Estes resultados demonstram que a composição da mistura determina a cinética do desenvolvimento da resistência à compressão no estado fresco, influenciando a taxa de hidratação.

- As misturas com maior volume de pasta (série 12) apresentaram consistentemente maior capacidade de carga, no estado fresco, em comparação com aquelas com menor volume de pasta (série 13). A incorporação de fibras de polipropileno, particularmente na mistura FM12PP12, melhorou significativamente o desempenho, evitando a deformação e promovendo o bloqueio de microfissuras, mantendo a integridade da resistência verde por períodos mais longos. Deve-se observar que o reforço com fibras retardou o início dos mecanismos de ruptura.
- Em condições ambientais controladas, o volume de pasta provou ser o principal fator que controla a evaporação da água em misturas sem fibras, com volumes de pasta mais elevados (REF12 e FM12: 457,92 L/m<sup>3</sup>) resultando em maiores perdas de água (1,26–1,32 kg/m<sup>2</sup>) em comparação com volumes mais baixos (REF13 e FM13: 398,55 L/m<sup>3</sup>, aproximadamente 1,10 kg/m<sup>2</sup>). A substituição parcial do cimento Portland por metacaulim e filer calcário reduziu marginalmente as taxas de evaporação devido ao melhor empacotamento das partículas e à maior área superficial específica do metacaulim.
- Nas misturas reforçadas com fibras, a incorporação de fibras aumentou significativamente a evaporação da água, especialmente no caso de fibras mais longas (12 mm), mesmo quando as relações água/cimento foram mantidas constantes dentro de cada grupo de misturas.
- A retração plástica das misturas sem fibras foi proporcional à perda de água, sendo maior nas misturas com maior teor de cimento e volume de pasta (série 12), enquanto a incorporação de aditivos minerais reduziu a retração, evidenciando o efeito positivo do melhor empacotamento das partículas na estabilidade dimensional.
- O reforço com fibras provou ser altamente eficaz no controle da retração plástica, apesar das taxas de evaporação iniciais mais altas observadas nas misturas contendo fibras. A mistura FM12PP12 alcançou uma redução significativa de 57% na retração plástica em comparação com a REF12, demonstrando excelente controle da deformação após aproximadamente uma hora de teste. A deformação final devido à retração das misturas reforçadas com fibras foi menor do que a das misturas sem fibras, confirmando que a restrição mecânica proporcionada pelas fibras supera os efeitos negativos do aumento da perda de água.

O Quadro 1 apresenta uma síntese das principais conclusões obtidas neste trabalho. Define-se o pico de tensão como o valor máximo de tensão registrado na curva tensão-deformação durante o ensaio, representando a máxima capacidade resistente do material antes do início da ruptura.

Quadro 1 – Resumo das conclusões

Parâmetro analisado	Resistência verde		Evaporação de água	Retração plástica	Mecanismo associado
	Pico de tensão	Tempo até o pico			
↑ Substituição por SCMs (metacaulim + fíler calcário)	↓ (redução inicial)	↑ (retarda – 30 → 60 min)	↓ (leve redução)	↓	Redução da taxa de hidratação + melhor empacotamento
↑ Volume de pasta (Série 12)	↑	↔	↑	↑↑	Maior teor de água e teor de cimento
↑ Teor de fibras PP	↑ (maior estabilidade pós-pico)	↑ (retarda ruptura)	↑ (série 13) ↓ (série 12)	↓↓↓	Restrição mecânica + ponte de microfissuras
↑ Comprimento das fibras (12 mm)	↑	↑	↑↑	↓↓↓	Maior capacidade de ancoragem
↑ Teor de cimento (sem fibras)	↑ inicial	↓ (pico mais rápido)	↑	↑↑↑	Maior calor de hidratação

Fonte: autoria própria (2026)

### 5.1. Trabalhos futuros

De modo a otimizar e potencializar o desenvolvimento de novas pesquisas, recomenda-se que estudos futuros investiguem:

- as propriedades mecânicas de longo prazo e o desempenho de durabilidade de misturas destinadas à impressão 3D, especialmente aquelas reforçadas com fibras;
- a retração plástica em amostras submetidas à retração livre e à retração restringida, bem como sob diferentes condições de cura; e

- a caracterização detalhada da estrutura porosa e da microestrutura das composições, visando compreender os mecanismos responsáveis pelo transporte de umidade e pelo controle de fissuras.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 305.1-14: Specification for hot weather concreting. Farmington Hills, MI: ACI, 2014.

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 16916: Agregado miúdo — Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16973: Agregados — Determinação do material fino passante na peneira 75 µm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2021.

AHMAD, Jawad *et al.* A Review on Failure Modes and Cracking Behaviors of Polypropylene Fibers Reinforced Concrete. **Buildings** **2022**, Vol. **12**, Page **1951**, v. 12, n. 11, p. 1951, 11 nov. 2022.

AHMED, Ghafur H. A review of “3D concrete printing”: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. **Journal of Building Engineering**, v. 66, p. 105863, 1 maio 2023.

AHMED, Ghafur H.; ASKANDAR, Nasih H.; JUMAA, Ghazi B. A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies. **Structures**, v. 43, p. 508–532, 1 set. 2022.

ASTBURY, Jon. **Xisui Design uses 3D-printed concrete boulders for playground in China**. Disponível em: <<https://www.dezeen.com/2025/08/15/xisui-design-3d-printed-boulder-park-china/>>. Acesso em: 16 fev. 2026.

BARBOSA, Marcella S. *et al.* Development of composites for 3D printing with reduced cement consumption. **Construction and Building Materials**, v. 341, p. 127775, 25 jul. 2022.

BISCHOF, Patrick; MATA-FALCÓN, Jaime; KAUFMANN, Walter. Fostering innovative and sustainable mass-market construction using digital fabrication with concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 161, p. 106948, 2022.

BUSWELL, R. A. *et al.* **3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research.** **Cement and Concrete Research** Elsevier Ltd, , 1 out. 2018.

CHEN, Qian; GARCÍA DE SOTO, Borja; ADEY, Bryan T. Construction automation: Research areas, industry concerns and suggestions for advancement. 2018.

CHEN, Yu *et al.* A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 45, 1 jan. 2022.

CHEN, Yuxuan *et al.* Rheology control and shrinkage mitigation of 3D printed geopolymers concrete using nanocellulose and magnesium oxide. **Construction and Building Materials**, v. 429, p. 136421, 24 maio 2024.

CHIUSOLI, Alberto. **The first 3D printed House with earth | Gaia | 3D Printers | WASP.** Disponível em: <<https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/>>. Acesso em: 16 fev. 2026.

COBOD. **3DCP Group 3D prints tiny house | COBOD International.** Disponível em: <<https://cobod.com/cobod-customer-makes-3d-printed-tiny-house/>>. Acesso em: 17 nov. 2025.

DA SILVA NETO, João Trajano *et al.* Fiber-reinforced cementitious composites: recent advances and future perspectives on key properties for high-performance design. **Discover Civil Engineering 2025 2:1**, v. 2, n. 1, p. 65-, 1 abr. 2025.

DE SOUZA DIAS, Leonardo *et al.* Evaluation of mix design parameters based on basic constitutive relationships for 3DCP printing. **Cerâmica**, v. 70, p. eZXBR6170, 2024.

DILBEROGLU, Ugur M. *et al.* The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 545–554, 1 jan. 2017.

DIXON, Emily. **Shanghai opens world's longest 3D-printed concrete bridge** | CNN. Disponível em: <<https://edition.cnn.com/style/article/shanghai-3d-printed-bridge-scli-intl/index.html>>. Acesso em: 16 nov. 2025.

ELS, Heinrich; VAN ZIJL, Gideon; DE VILLIERS, Wibke. A review of shrinkage and restrained shrinkage cracking in 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 111, p. 113233, 1 out. 2025a.

ELS, Heinrich; VAN ZIJL, Gideon; DE VILLIERS, Wibke. A review of shrinkage and restrained shrinkage cracking in 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 111, p. 113233, 1 out. 2025b.

FEDEROWICZ, Karol *et al.* Early-Age Shrinkage Monitoring of 3D-Printed Cementitious Mixtures: Comparison of Measuring Techniques and Low-Cost Alternatives. **Materials** **2026**, Vol. 19, Page 344, v. 19, n. 2, p. 344, 15 jan. 2026.

GARG, Mohit; AZARSA, Pejman; GUPTA, Rishi. Self-Healing Potential and Post-Cracking Tensile Behavior of Polypropylene Fiber-Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Composites Science** **2021**, Vol. 5, Page 122, v. 5, n. 5, p. 122, 7 maio 2021.

GIRSKAS, Giedrius; KLIGYS, Modestas. 3D Concrete Printing Review: Equipment, Materials, Mix Design, and Properties. **Buildings** **2025**, Vol. 15, Page 2049, v. 15, n. 12, p. 2049, 14 jun. 2025.

GRACE, Kate. **World's First 3D Printed Community Minimises Homelessness in Mexico** | **ArchDaily**. Disponível em: <<https://www.archdaily.com/930556/worlds-first-3d-printed-community-minimises-homelessness-in-mexico>>. Acesso em: 16 fev. 2026.

HAN, Xiaoyu *et al.* Plastic shrinkage of 3D printed concrete under different self-weight of upper layers. **Construction and Building Materials**, v. 399, p. 132564, 5 out. 2023.

HAYEK, Mahmoud; EL BITOURI, Youssef; YAHIA, Ammar. Time-Dependent Structuration of Cement Pastes with Mineral Additions: A Yield Stress-Based Approach. **Buildings** **2025**, Vol. 15, Page 4297, v. 15, n. 23, p. 4297, 27 nov. 2025.

HOUSER, Kristin. **Virginia launches world's biggest 3D-printed housing project**. Disponível em: <<https://www.freethink.com/hard-tech/3d-printing-houses>>. Acesso em: 17 nov. 2025.

HUANG, Bo *et al.* Optimized synergy of fiberglass mesh and PP fibers-modified structural adhesive for enhanced mechanical and microstructural performance in 3D printing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 506, p. 144910, 13 jan. 2026.

JACOB, Sara. **Genesis by Contour3D, CoLab and Versiclad - Video Feature - The Local Project**. Disponível em: <[https://thelocalproject.com.au/videos/genesis-by-contour3d-colab-and-versiclad-video-feature-the-local-project/?srsltid=AfmBOorwyU6uHNI2sZPPKjZeAo9diP5XJqCXfOLTrkjS3zYU\\_7g2CtWm](https://thelocalproject.com.au/videos/genesis-by-contour3d-colab-and-versiclad-video-feature-the-local-project/?srsltid=AfmBOorwyU6uHNI2sZPPKjZeAo9diP5XJqCXfOLTrkjS3zYU_7g2CtWm)>. Acesso em: 16 fev. 2026.

KANAVARIS, Fragkoulis *et al.* Assessment of behaviour and cracking susceptibility of cementitious systems under restrained conditions through ring tests: A critical review. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 137–153, 1 jan. 2019.

KRISTOMBU BADUGE, Shanaka *et al.* **Improving performance of additive manufactured (3D printed) concrete: A review on material mix design, processing, interlayer bonding, and reinforcing methods**. StructuresElsevier Ltd, , 1 fev. 2021.

LEI, Dong Yi *et al.* The connection between microscopic and macroscopic properties of ultra-high strength and ultra-high ductility cementitious composites (UHS-UHDCC). **Composites Part B: Engineering**, v. 164, p. 144–157, 1 maio 2019.

LER, Kee Hong *et al.* **Porosity and durability tests on 3D printing concrete: A review**. **Construction and Building Materials**Elsevier Ltd, , 4 out. 2024.

LI, Victor C. *et al.* **On the emergence of 3D printable Engineered, Strain Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC).** *Cement and Concrete Research* Elsevier Ltd, , 1 jun. 2020.

LIAN, Chunming *et al.* Low-Carbon, Low-Shrinkage Concrete Design Based on Paste–Aggregate Binary Model. *Materials* **2025, Vol. 18, Page 3292**, v. 18, n. 14, p. 3292, 12 jul. 2025.

LIN, Shao Qun *et al.* A Novel Approach to Surface Strain Measurement for Cylindrical Rock Specimens Under Uniaxial Compression Using Distributed Fibre Optic Sensor Technology. *Rock Mechanics and Rock Engineering* **2021 54:12**, v. 54, n. 12, p. 6605–6619, 24 set. 2021.

LIU, Guoming *et al.* Rheological properties of fresh concrete and its application on shotcrete. *Construction and Building Materials*, v. 243, p. 118180, 20 maio 2020.

MA, Guowei *et al.* Mechanical anisotropy of aligned fiber reinforced composite for extrusion-based 3D printing. *Construction and Building Materials*, v. 202, p. 770–783, 30 mar. 2019.

MARKIN, Slava *et al.* Deformation behaviour of 3D-printed concrete elements induced by plastic shrinkage. *Construction and Building Materials*, v. 449, p. 138073, out. 2024.

MARKIN, Slava; COMBRINCK, Riaan; MECHTCHERINE, Viktor. Specifics of plastic shrinkage in 3D-printed concrete elements. *Cement and Concrete Research*, v. 184, p. 107512, out. 2024.

MARKIN, Slava; MECHTCHERINE, Viktor. Quantification of plastic shrinkage and plastic shrinkage cracking of the 3D printable concretes using 2D digital image correlation. *Cement and Concrete Composites*, v. 139, 1 maio 2023.

MASKURIY, Raihan *et al.* Industry 4.0 for the Construction Industry—How Ready Is the Industry? *Applied Sciences* **2019, Vol. 9**, v. 9, n. 14, 14 jul. 2019.

MECHTCHERINE, Viktor *et al.* A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 157, 1 jul. 2022.

MEDEIROS, Fernanda K. *et al.* Effect of sisal fibers on the behavior of 3D-printed cementitious mixtures exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 492, p. 143037, 19 set. 2025.

MOELICH, G. M.; KRUGER, P. J.; COMBRINCK, R. Mitigating early age cracking in 3D printed concrete using fibres, superabsorbent polymers, shrinkage reducing admixtures, B-CSA cement and curing measures. **Cement and Concrete Research**, v. 159, p. 106862, 1 set. 2022.

MOELICH, Gerrit M.; KRUGER, Jacques; COMBRINCK, Riaan. Plastic shrinkage cracking in 3D printed concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 200, 1 nov. 2020.

MOHAN, Manu K. *et al.* Salt Scaling Resistance of 3D Printed Concrete. *In: RILEM Bookseries*. Springer Science and Business Media B.V., 2022. v. 37 p. 188–193.

MX3D. **Smarter Bridge**. Disponível em: <<https://mx3d.com/case/mx3d-bridge/>>. Acesso em: 16 nov. 2025.

NIU, Xu Jing *et al.* Effects of ambient temperature, relative humidity and wind speed on interlayer properties of dam concrete. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119791, 10 nov. 2020.

NODEHI, Mehrab *et al.* **Durability properties of 3D printed concrete (3DPC)**. **Automation in Construction** Elsevier B.V., , 1 out. 2022.

NUNES, Gabrielly M. *et al.* Evaluation of the mechanical behaviour of representative volumetric elements of 3DCP masonry mixtures with partial replacement of cement by limestone filler and metakaolin. **Journal of Building Engineering**, v. 78, p. 107650, 1 nov. 2023.

QU, Zhiwei *et al.* A review on early-age cracking of concrete: Causes and control. **Case Studies in Construction Materials**, v. 21, n. 2, p. e03848, 1 dez. 2024.

SANJAYAN, Jay G. *et al.* Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 468–475, 30 maio 2018.

SCHREIER, Hubert; ORTEU, Jean José; SUTTON, Michael A. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications. *In: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. [S.l.]: Springer US, 2009. p. 1–10.

SUPRIYA *et al.* Low-CO<sub>2</sub> emission strategies to achieve net zero target in cement sector. **Journal of Cleaner Production**, v. 417, p. 137466, 10 set. 2023.

TAN, Chiang Ti *et al.* Mechanical property enhancement in concrete composites with hybrid polypropylene fibre reinforcement. **Scientific Reports 2025 15:1**, v. 15, n. 1, p. 24986-, 10 jul. 2025.

TRAN, Mien V.; CU, Yen T. H.; LE, Chau V. H. Rheology and shrinkage of concrete using polypropylene fiber for 3D concrete printing. **Journal of Building Engineering**, v. 44, p. 103400, 1 dez. 2021.

UNO, Paul John. Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 95, n. 4, p. 365–375, 1998.

VAN DER PUTTEN, Jolien *et al.* Development of 3d printable cementitious composites with the incorporation of polypropylene fibers. **Materials**, v. 14, n. 16, 2 ago. 2021.

VAN GOGH, Vincent. *Letter 274* (to Theo van Gogh), The Hague, 22 Oct. 1882. *In: Vincent van Gogh: The Letters*. Edited by Leo Jansen, Hans Luijten & Nienke Bakker. London: Thames & Hudson, 2009.

VARGAS, Armando; ROBAYO-SALAZAR, Rafael; MEJÍA DE GUTIÉRREZ, Ruby. Effects of Incorporating Fine Aggregates and Polypropylene Microfibres on the Cracking Control of

3D Printed Cementitious Mixtures. **Buildings 2025, Vol. 15, Page 55**, v. 15, n. 1, p. 55, 27 dez. 2024.

WANG, Suguo *et al.* Effects of Aggregate Size and Nozzle Diameter on Printability and Mechanical Properties of 3D Printed Ferronickel Slag-GGBFS Concrete. **Materials (Basel, Switzerland)**, v. 18, n. 15, 1 ago. 2025.

ZAT, Tuani *et al.* Rheological properties of high-performance concrete reinforced with microfibers and their effects on 3D printing process. **Journal of Building Engineering**, v. 105, p. 112406, 1 jul. 2025.

ZENG, Qiang *et al.* The Effect of Harsh Environmental Conditions on Concrete Plastic Shrinkage Cracks: Case Study Saudi Arabia. **Materials**, v. 15, n. 23, p. 8622, 1 dez. 2022.

ZHANG, Chao *et al.* Mix design concepts for 3D printable concrete: A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 122, p. 104155, 1 set. 2021a.

ZHANG, Hanghua *et al.* Advanced measurement techniques for plastic shrinkage and cracking in 3D-printed concrete utilising distributed optical fiber sensor. **Additive Manufacturing**, v. 74, p. 103722, 25 jul. 2023.

ZHANG, Kun *et al.* What is the mechanism of the fiber effect on the rheological behavior of cement paste with polycarboxylate superplasticizer? **Construction and Building Materials**, v. 281, p. 122542, 26 abr. 2021b.

ZHANG, Mingming *et al.* High-Performance Materials Improve the Early Shrinkage, Early Cracking, Strength, Impermeability, and Microstructure of Manufactured Sand Concrete. **Materials 2024, Vol. 17, Page 2465**, v. 17, n. 10, p. 2465, 20 maio 2024.

ZHAO, Haixin *et al.* Effect of clay content on plastic shrinkage cracking of cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 342, 1 ago. 2022.