

Evolução, métodos e materiais na manufatura aditiva aplicada à construção civil

FELIPE S. B. JORGE - MESTRE - <https://orcid.org/0000-0001-8199-9466> (felipe.jorge@ifro.edu.br) — IFRO Campus Vilhena
CONRADO DE SOUZA RODRIGUES - DR. — CEFET - MG

RESUMO

O ARTIGO ABORDA A EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA CONHECIDO COMO IMPRESSÃO 3D, DESDE SEU SURGIMENTO NOS ANOS 1980 ATÉ SUA APLICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO CIVIL. INICIALMENTE UTILIZADA NA PRODUÇÃO DE PEÇAS PEQUENAS E COMPLEXAS PARA AS INDÚSTRIAS AUTOMOTIVA E MÉDICA, A TECNOLOGIA AVANÇOU COM NOVOS MÉTODOS, COMO ESTEREOLITOGRAFIA, SINTERIZAÇÃO SELETIVA A LASER E MODELAGEM POR DEPOSIÇÃO FUNDIDA. NA CONSTRUÇÃO CIVIL, A IMPRESSÃO 3D GANHOU DESTAQUE A PARTIR DE 2014 COM A IMPRESSÃO DE CONCRETO (3DCP), PERMITINDO A CRIAÇÃO DE ELEMENTOS ESTRUTURAIS SEM FORMAS TRADICIONAIS E REDUZINDO MÃO DE OBRA E DESPERDÍCIO. OS PRINCIPAIS MÉTODOS SÃO A IMPRESSÃO POR EXTRUSÃO E POR LEITO DE PARTÍCULAS, EXIGINDO MATERIAIS ESPECÍFICOS COM BOA BOMBEABILIDADE, EXTRUDABILIDADE E ADERÊNCIA ENTRE CAMADAS. ALÉM DISSO, A PESQUISA DESTACA O USO DE EQUIPAMENTOS COMO PÓRTICOS E BRAÇOS ROBÓTICOS PARA OTIMIZAR O PROCESSO. A TECNOLOGIA APRESENTA DESAFIOS, MAS PROMETE REVOLUCIONAR A ENGENHARIA CIVIL E A ARQUITETURA.

PALAVRAS-CHAVE: MANUFATURA ADITIVA, CONSTRUÇÃO CIVIL, TECNOLOGIA.

1. INTRODUÇÃO

O processo de impressão 3D, ou manufatura aditiva, surgiu no final do século XX com o objetivo de produzir de forma automática peças de tamanhos reduzidos a partir de modelos digitais. A partir do desenvolvimento dessa tecnologia, alguns setores passaram a adotá-la para produção de elementos com alta precisão, como é o caso da indústria automotiva, espacial e na medicina. Desde seu

surgimento, diversos materiais têm sido adotados para diferentes tipos de processos de impressão, como é o caso dos polímeros, metais e, em última análise, os compostos cimentícios e demais materiais de construção.

O objetivo desse trabalho é fazer um apanhado histórico da evolução dos processos de manufatura aditiva, os principais materiais empregados e a evolução dos métodos de impressão. Em uma análise mais aprofundada, serão abordados os primeiros passos dessa tecnologia na construção civil, as características necessárias dos materiais a serem empregados, bem como as diferenças nos processos de execução. Pretende-se, com essa revisão, disseminar o conhecimento acerca dessa tecnologia na busca de mitigar seus entraves, que, apesar de existentes, já apresentam grande evolução em termos de soluções, tornando esse processo construtivo uma realidade promissora na área da Engenharia Civil e Arquitetura.

1.1 Histórico da impressão 3D

Segundo Hager *et al.* (2016), a tecnologia de impressão em 3D surgiu no início da década de 1980, através da pesquisa de Charles W. Hull. Surge o processo de estereolitografia, que consistia na prototipagem rápida de elementos a partir de um software de computador e a utilização de resinas poliméricas com propriedades capazes de viabilizar seu uso em situações específicas. Esse processo permitiu a produção de peças com alta precisão e geometrias mais complexas, possibilitando seu uso em diversas áreas, como a produção de próteses e instrumentos para área mé-

dica, e elementos complexos para a indústria automotiva e aeronáutica.

Apesar das variações dos métodos de impressão, o processo consiste basicamente em três etapas: criação do modelo digital e seu processamento para produção (fatiamento do modelo 3D em camadas 2D), deposição do material e o processo de “cura” do material atingindo as características físicas desejadas (Wu *et al.*, 2016).

1.2 Métodos de impressão

O primeiro método de manufatura aditiva, citado anteriormente, é a Estereolitografia, mas além dele, existem outros métodos, como a Sinterização Seletiva a Laser (SLS), a Modelagem de Deposição Fundida (FDM), Impressão a Jato de Tinta em Pó e a técnica de Construção pelo Contorno (Wu, *et al.*, 2016).

A Estereolitografia consiste na deposição de um polímero líquido em uma plataforma que se desloca para que sejam construídas, camada por camada, as peças desejadas. Um feixe ultravioleta endurece o polímero, tornando possível a construção de múltiplas camadas.

No caso da Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é utilizado um material em forma de pó, que recebe um feixe de laser direcionado, fundindo esse material. Geralmente são usados materiais de alta resistência e flexibilidade, como nylon e poliestireno. Também podem ser utilizados metais nesse tipo de processo, o que confere alta resistência nos elementos produzidos por essa técnica (Hager, *et al.*, 2016 e Wu, *et al.*, 2016).

A Modelagem de Deposição Fundida (FDM) foi inventada em 1988 e utiliza

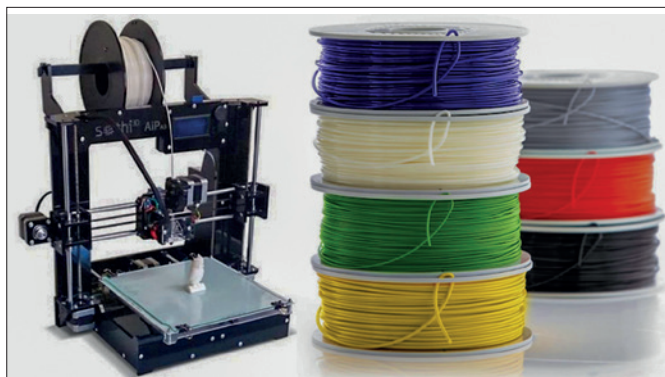


FIGURA 1
IMPRESSORA FDM

FONTE: LNNANO (2025)

filamentos poliméricos para a produção de peças em 3D a partir da sobreposição de camadas e o deslocamento da plataforma (Figura 1). O bico de impressão possui um aquecedor que mantém o filamento no ponto de fusão adequada para sua deposição em camadas. É o método de manufatura aditiva mais popular no mundo pela gama de aplicações que pode ter (Hager, *et al.*, 2016).

O processo de Impressão em Jato de Tinta em Pó consiste na pulverização de um material ligante em um leito de pó. A partir daí, esse material é aquecido e seco através de uma lâmpada e a cura final posterior é feita em um forno. Como nos outros processos, trabalha em camadas em uma plataforma que se desloca para baixo para a deposição sequencial (Wu, *et al.*, 2016).

Dentre os processos de manufatura aditiva, o mais recente e que se apresenta como mais promissor e adequado à construção civil é a Construção por Contorno (CC). Esse processo consiste na utilização de um pórtico de impressão capaz de deslocar o bico de impressão horizontalmente, depositando o material em camadas (Figura 2). Ao contrário das outras técnicas, o CC é executado no local onde ficará o objeto produzido. Em certa medida, se assemelha ao processo de produção de elementos pré-moldados de concreto, mas no CC não há a necessidade de fôrmas ou trabalhadores durante a manufatura, todo o processo é controlado via software. Essa técnica foi inventada pelo grupo de pesquisa da Southern California University (Şahin *et al.*, 2022 e Hager, *et al.*, 2016).

- b) SLS: nylon, aço rápido;
- c) FDM: termoplásticos como acrilonitrila butadieno estireno (ABS), elastômero, ácido polilático (PLA), cera, metal;
- d) Impressão jato de tinta em pó: polímeros, metais;
- e) Construção por contorno: matérias cerâmicas (concreto, argamassa).

2. IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Os primeiros estudos aplicando a tecnologia de manufatura aditiva na construção civil datam do início dos anos 2000, com a produção de elementos utilizados na construção civil, dada à disponibilidade, até então, de produção de pequenos elementos, tanto que a tecnologia ainda era chamada de “Prototipagem rápida”. Também é nesse período que passam a ser produzidos modelos arquitetônicos através de manufatura aditiva, possibilitando a visualização de geometrias complexas em protótipos arquitetônicos (Wu *et al.*, 2016).

Mas, foi a partir de 2014, que começam a ser produzidos elementos de concreto para construção civil, surgindo o termo 3DCP (3D Concrete

1.3 Materiais

Cada processo de manufatura aditiva está melhor adaptado a algum tipo de material, como vimos no tópico anterior. Segundo (Wu *et al.*, 2016), podemos classificar cada processo associando-os aos seus respectivos materiais:

- a) Estereolitografia: resinas fotossensíveis líquidas;

Printing). Algumas empresas passam a produzir peças de concreto para montagem na obra, de forma semelhante ao processo de construções pré-fabricadas (Wu *et al.*, 2016 e Hager *et al.*, 2016).

Nesse período, em Amsterdã, a empresa Dus Architects inicia a construção da *Canal House*, utilizando peças de concreto produzidas por impressora 3D. Na China, na mesma época, foram construídas casas e um edifício com processo semelhante, adotando, além do concreto, outros materiais incorporados, como fibra de vidro, que melhoraram as propriedades físicas dos elementos em concreto.

Segundo Şahin *et al.*, 2022, as principais vantagens relatadas no processo de manufatura aditiva na construção são:

- ▶ Liberdade geométrica para formas complexas, flexibilidade de design;
- ▶ Eliminação de fôrmas para execução dos elementos;
- ▶ Diminuição da mão de obra no canteiro;
- ▶ Redução da geração de resíduos e desperdício de materiais;
- ▶ Redução tempo de execução.

Conforme mencionado na seção anterior, o principal método de manufatura aditiva utilizado na construção civil é a Construção pelo Contorno. Nesse processo, os materiais são extrudados a partir de um bico acoplado a um pórtico que se desloca nos eixos X e Y, expelindo o material para a construção camada por camada. Entretanto, outra tecnologia, que funciona de forma semelhante à Impressão a Jato de Tinta em Pó, tem sido empregada, na qual o ligante é depositado pelo bico de impressão sobre

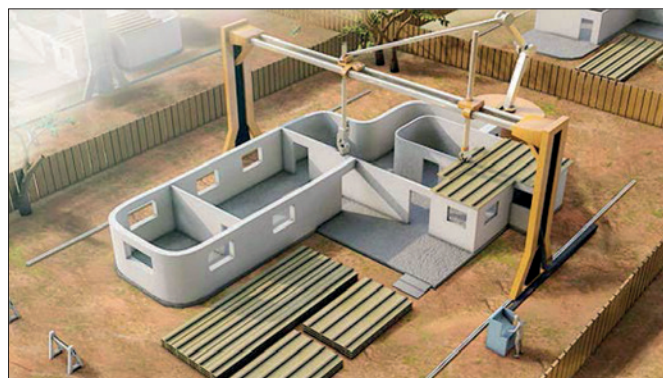


FIGURA 2
IMPRESSORA CONSTRUÇÃO POR CONTORNO (CC)

FONTE: RANJHA *et al.*, 2018



FIGURA 3

ESQUEMA DE IMPRESSÃO POR EXTRUSÃO

FONTE: ADAPTADO DE WANG, *et al.* (2024)

um leito de partículas, conforme detalhado no próximo tópico (Sanjayan *et al.*, 2018).

2.1 Leito de partículas ou impressão à base de pó

Apesar de não ser o foco dessa pesquisa, que abordará com mais detalhes a manufatura aditiva por extrusão, é importante introduzir esse método, uma vez que pesquisas têm sido desenvolvidas através dele, mesmo com limitações que dificultam seu uso na construção civil em larga escala.

O estudo de Wang *et al.*, 2024 apresenta três metodologias de abordagem utilizando a impressão por leito de partículas, que consiste na deposição de um material líquido/pastoso sobre um leito de partículas, que pode variar conforme cada um desses diferentes métodos.

A primeira metodologia, chamada de Ativação Seletiva de Cimento (SCA) (Shakor *et al.*, 2020a *apud* Wang *et al.*, 2024) consiste na deposição de água em um leito de cimento misturado com agregados finos de dimensão máxima 1mm. No segundo método, conhecido como Intrusão Seletiva de Pasta (SPI) (Weger e Gehlen, 2021 *apud* Wang *et al.*, 2024), uma pasta de cimento muito fluida é depositada sobre um leito de agregados finos de dimensões entre 1mm e 5mm. Na terceira proposta, a pesquisa utilizou argamassa depositada sobre um leito de agregados graúdos, com dimensões entre 5mm e 32mm (Yu *et al.*, 2020, 2022 *apud* Wang *et al.*, 2024); esse processo recebeu o nome de Ligação de Agregados Graúdos (*Coarse Aggregate Binding – CAB*).

Todos esses métodos trabalham de forma semelhante; portanto, tendo as mesmas limitações. Uma vez que é necessário que o elemento seja produzido dentro de um leito de partículas, isso acaba limitando a produção a peças de reduzido tamanho, que podem ser usadas como componentes para a construção civil. A execução de uma edificação completa, de forma automática, ainda é inviável.

utilizado na construção civil é a impressão pelo contorno (ou caminho), também chamado de extrusão. Segundo Wang *et al.*, 2024, o processo de manufatura aditiva conhecido por extrusão, de certa forma, é bastante intuitivo, pois é baseado no bombeamento de uma mistura de materiais e seu depósito através de um bico de impressão, camada sobre camada, ao longo de um caminho pré-definido. A Figura 3 ilustra esse processo.

Nesse contexto, além das propriedades dos materiais, também são cruciais, para a impressão correta dos elementos, os parâmetros de impressão (como velocidade, percurso, altura de cada camada, distância entre o bico e o leito de impressão etc.) e as características do equipamento, como tamanho e formato do bico, capacidade da bomba, dimensões do pórtico ou alcance do braço robótico etc. Outro aspecto a ser levado em consideração é o intervalo de sobreposição das camadas, que, no caso de muito curto, pode provocar o colapso da camada superior sobre a inferior (a camada inferior ainda não adquire resistência suficiente) e, no caso de muito longo, prejudica a aderência entre as camadas, reduzindo sua força de ligação (Wang, *et al.*, 2024).

As características dos equipamentos podem provocar alterações no processo de produção, conforme será melhor detalhado em seção adiante.

2.3 Características das misturas (materiais)

Conforme os estudos de Le *et al.* (2012), algumas características das misturas são fundamentais para a execução do 3DCP. Considerando o concreto em estado fresco, essas características se relacionam e a dosagem de cada componente da mistura trará consequências positivas ou negativas para o resultado final, ou seja, para o objeto extrudado de concreto no estado endurecido, que é o momento que ele atinge as propriedades desejadas em

2.2 Impressão de concreto pelo contorno (extrusão)

O outro processo de impressão em concreto

projeto, seja pela resistência mecânica, seja pela geometria. Destacam-se nesse contexto a bombeabilidade, a extrudabilidade (características relacionadas à trabalhabilidade do concreto fresco), o tempo aberto e a construtibilidade (estágio de transição para o estado endurecido).

2.3.1 BOMBEABILIDADE

Segundo Buswell *et al.* (2018), a bombeabilidade é a capacidade da mistura em seu estado fresco de ser transferida do reservatório até o bico extrusor através de uma bomba. Nesse processo, a segregação das partículas ao longo da mangueira pode bloquear a passagem, sendo necessário que a mistura seja completamente homogênea e que seja previsto, desde a fase de projeto da mistura, ou *mix design*, a segregação. Alguns estudos, como o de Le *et al.* (2012), estabelecem a faixa de tensão de escoamento da mistura ao longo da mangueira, para que a mesma seja suficientemente bombeável sem que o filamento fosse descontinuado estabelecendo os limites entre 0,3 kPa e 0,9 kPa (tensões mínima e máxima).

2.3.2 EXTRUDABILIDADE

Essa característica se refere à capacidade da mistura ser aplicada através de um bico extrusor (impressão) sem que haja deformação transversal considerável e que seja mantida a continuidade do filamento (Buswell *et al.*, 2018). A extrudabilidade é diretamente afetada pelo tamanho das partículas, na qual quanto maior o diâmetro das mesmas, mais comprometida fica a passagem do material pelo bico. O estudo de Le *et al.* (2012) faz uma análise de diferentes misturas com variações entre o percentual de areia e material ligante e o resultado mostra que quanto maior a quantidade de areia na mistura, maior a segregação das partículas e menor é a capacidade de extrusão. A extrudabilidade pode ser mensurada a partir de diversos métodos, dentre eles a equação de Benbow-Bridgwater, o uso do *slug test*, *squeeze test method*, resistência à penetração, entre outros (Boddepalli *et al.*, 2023).

Outro fator que deve ser levado em consideração é o formato do bico, que pode variar entre redondo ou retangular.

Essa é uma característica que deve ser levada em consideração principalmente nas mudanças de direção da impressão. Para cada formato de bico, bem como a dimensão do filamento extrudado, há uma janela ideal de velocidade de deposição (Buswell *et al.*, 2018).

2.3.3 TEMPO ABERTO

O percurso de extrusão e a velocidade de deposição do material são fatores-chave no processo, pois devem ser dimensionados para garantir que a mistura de argamassa/concreto tenha escoamento suficiente ao ser bombeada, sendo viável a extrusão através do bico. Além disso, deve garantir que a camada depositada tenha tempo suficiente de endurecimento para que seja capaz de suportar a próxima sem colapsar, mas que não tenha enrijecido a ponto de provocar a “junta fria” entre as camadas. Essa janela é chamada de “tempo aberto” ou “tempo de ciclo” e corresponde ao intervalo de tempo entre a deposição de uma camada de material e a camada superior seguinte (Buswell *et al.*, 2018).

Para o concreto convencional, essa propriedade está relacionada ao tempo de pega (início e fim) e é mensurada através do aparelho de Vicat. Para o 3DCP, o tempo aberto se refere ao momento limite onde a mistura ainda consegue ser bombeada e extrudada (trabalhabilidade) e o momento no qual ela já possui resistência suficiente para suportar a camada superior sem perda das características geométricas e que ainda seja capaz de se fundir com a camada seguinte (sem junta fria). Esse intervalo varia de acordo com os constituintes da mistura e características do conjunto bomba/mangueira/bico (Le *et al.*, 2012).

Dessa forma, o projeto de mistura fornecerá um tempo de ciclo que irá, em conjunto com as propriedades do equipamento de impressão, definir qual o tamanho do percurso a ser impresso, a velocidade de impressão e o intervalo de tempo ideal entre as camadas.

2.3.4 CONSTRUTIBILIDADE

A construtibilidade do 3DCP é dada pela capacidade do mesmo de suportar a deposição das camadas superiores sem

deformações significativas nas camadas inferiores ou o colapso da estrutura impressa (Le *et al.*, 2012). Essa característica está diretamente relacionada ao tempo aberto visto na seção anterior. Caso a mistura não tenha adquirido resistência suficiente, ela não irá suportar o peso próprio das camadas superiores e a estrutura entrará em colapso.

A deformação da camada inferior provocada pelo peso próprio da camada adicionada é, até certo ponto, desejável, pois é por causa dela que ocorre a aderência entre as camadas (Buswell *et al.*, 2018). Ainda segundo os autores, ao longo da deposição de camadas e por consequência, a deformação pelo peso próprio, a distância entre o bico e o leito da impressão tende a ser aumentada, o que deve ser corrigido no decorrer do processo para que não haja variação no filamento, alterando a adesão entre as camadas.

2.4 Equipamento de impressão

Bazli *et al.*, 2023 apresenta em sua pesquisa três maneiras comumente utilizadas nos processos de 3DCP. A primeira delas trata-se de uma estrutura em forma de pórtico, capaz de se deslocar por coordenadas cartesianas XYZ. Nesse processo, o volume do pórtico é que define a capacidade de impressão e a mesma acontece pelo deslocamento horizontal (XY) do bico de impressão e o deslocamento global do eixo de impressão na vertical (eixo Z) define as alturas das camadas sucessivas.

O segundo processo apresentado utiliza braços robóticos. É uma tecnologia mais nova e permite que o bico de impressão tenha maior liberdade de deslocamento, tornando possível movimentos de rotação e inclinação. Essa liberdade de movimentos possibilita

um maior ajuste da deposição das camadas, aproveitando o conceito de “Abordagem de Continuidade Tangencial”, na qual o repasse de carga à camada inferior se dá de forma tangencial, melhorando a transmissão de esforços. Esse sistema também possibilita um ajuste mais refinado durante a extrusão nas curvaturas do percurso. A Figura 4 ilustra a diferença na transmissão de esforços para camadas inferiores. Ao lado esquerdo, vemos a sobreposição de camadas convencional e percebemos a reduzida área de contato nas camadas que não estão exatamente sobrepostas. No lado direito, temos a abordagem de continuidade tangencial, na qual a altura de camadas é variável, entretanto, tem-se uma área de contato maior e constante entre as mesmas, aumentando a aderência. Uma limitação nesse processo é o alcance do braço robótico, que pode interferir nas dimensões de projeto.

Wang *et al.* (2024) ratifica a pesquisa citada anteriormente sobre os dois principais métodos de extrusão de concreto atualmente utilizados.

Ainda há um terceiro método, apresentado na pesquisa de Bazli *et al.* (2023) e mostrado na Figura 5 (esquema) e Figura 6 (robôs em operação). Consiste na utilização de robôs, chamados de *minibuilders* (miniconstrutores), onde um conjunto de três robôs são utilizados para determinadas etapas da construção.

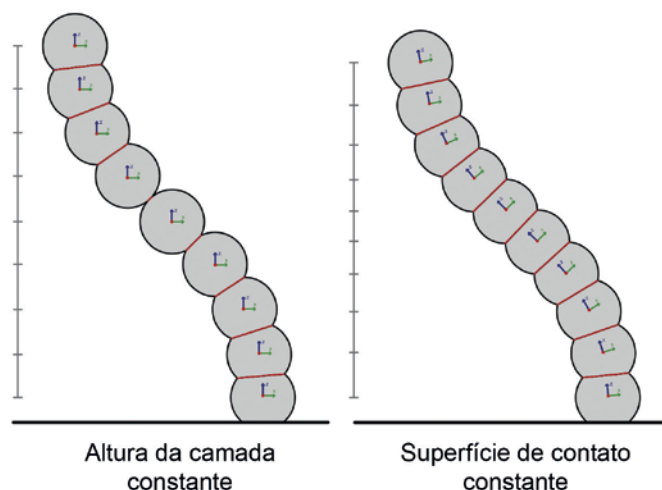


FIGURA 4

TRANSMISSÃO DE ESFORÇOS COM ABORDAGEM TANGENCIAL

FONTE: ADAPTADO DE BUSWELL, *et al.* (2018)

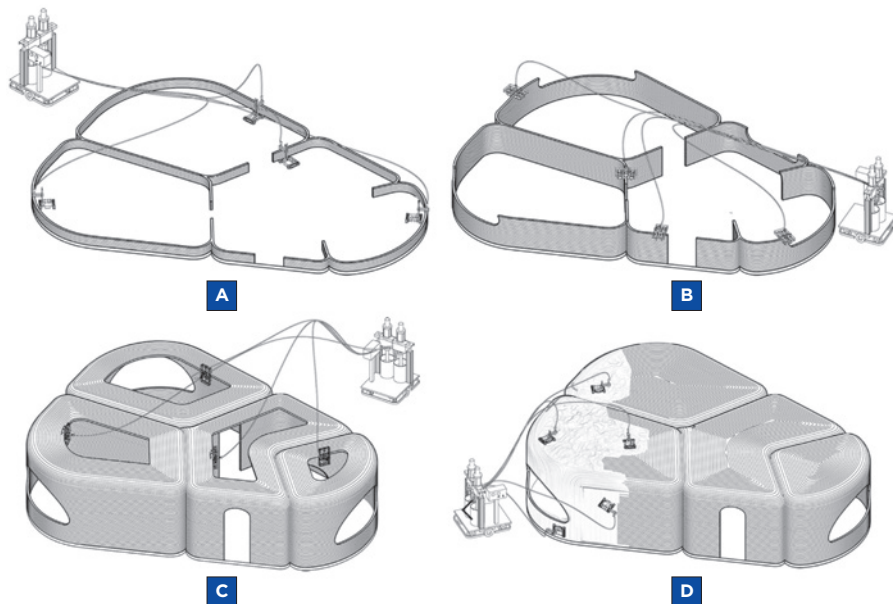


FIGURA 5

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DOS MINIBUILDERS.

(A) CAMADAS DE FUNDAÇÃO, (B) A CONSTRUÇÃO DAS PAREDES, (C) OS FORROS E (D) REFORÇO COM CAMADAS ADICIONAIS

FONTE: ADAPTADO DE BAZLI *et al.* (2023)

O primeiro robô executa a fundação conforme o caminho previsto em projeto; após a fundação concluída, um segundo robô trabalha na execução das paredes acoplado a rolos que se deslocam sobre a fundação. Há um terceiro robô, que executa os trabalhos de impressão horizontal, fixado através de ventosas (deposição de camadas na vertical).

3. DESAFIOS DO PROCESSO

Embora haja inúmeras vantagens no processo 3DCP, alguns desafios importantes devem ser considerados para sua efetiva implantação em larga escala. Desvincular essa tecnologia de seus pontos negativos é ilusório e pode levar ao fracasso em sua implantação. O estudo de Bazli *et al.* (2023) elenca alguns dos principais desafios para implantação dessa nova tecnologia, entre eles:

- a) **redução de empregos:** impacto na força de trabalho voltada para construção civil provocado pela automatização do processo. Estas atividades tendem a ser ocupadas pelos trabalhadores de classes econômicas mais baixas, sua eliminação pode provocar um problema social e econômico de grande importância;
- b) **aparência das superfícies:** edificações produzidas por extrusão de concreto possuem a superfície mais rugosa que pelo método convencional, o que pode

não atender às expectativas estéticas dos usuários;

- c) **custo:** o custo inicial de uma impressora, bem como sua mobilização, pode gerar gastos elevados, inviabilizando a sua adoção;
- d) **adequação dos materiais:** um grande problema no 3DCP é a disponibilidade de materiais adequados, uma vez que as misturas de concreto precisam possuir características específicas, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, conforme descrito no capítulo anterior;
- e) **integridade estrutural e durabilidade:** devido à composição dos elementos de 3DCP ser em forma de filamento, microfissuras podem surgir durante o processo de extrusão, o que pode comprometer a integridade estrutural

dos elementos. Há ainda a necessidade de garantir a aderência entre as camadas, para que respondam de forma solidarizada aos esforços de compressão e flexão. Também há questões a serem resolvidas relacionadas à durabilidade das estruturas, uma vez que os poros existentes nesses elementos costumam ser interconectados entre as camadas, o que afeta significativamente a durabilidade das estruturas;

- f) **mão de obra especializada:** para os processos de manufatura aditiva de concreto, torna-se extremamente necessário o treinamento das equipes de trabalho, desde a elaboração dos projetos de forma a permitir a impressão (BIM), passando pela operação e configuração dos parâmetros de impressão e, principalmente, aos envolvidos no preparo das misturas de concreto, não havendo margem para grandes alterações nos componentes;
- g) **regulamentação:** por último, mas não menos importante, tem-se a necessidade de regulamentação de edificações produzidas com 3DCP. A padronização e atendimento a critérios de produção é o que pode tornar a produção em larga escala viável. Questões culturais e de segurança construtiva dependem da presença de regulamentos específicos para esse tipo de processo de construção. Cita-se ainda que, num cenário onde grande parte das

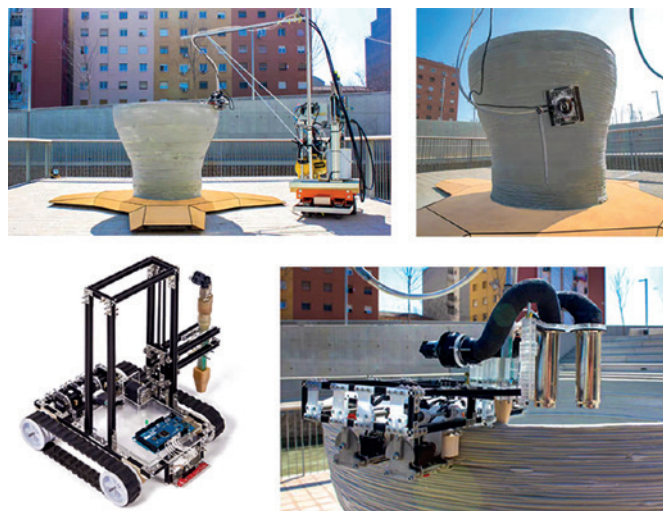


FIGURA 6

MINIBUILDERS EM OPERAÇÃO NA HORIZONTAL E NA VERTICAL (ACIMA), DETALHES DO ROBÔ (ABAIXO)

FONTE: NEWATLAS (2014)

edificações são adquiridas mediante financiamento bancário, se faz necessária a normatização dos processos construtivos visando à segurança das obras.

4. CONCLUSÕES

Após essa análise do contexto atual referente à impressão 3D em concreto, algumas conclusões podem ser fixadas, principalmente referente à solução dos desafios de implantação da mesma em larga escala, graças a uma significativa e rápida evolução na temática.

É necessária uma análise socioeconômica dos impactos desse método construtivo na cadeia da construção civil, principalmente nos países não desenvolvidos, nos quais a mão de obra da construção é parcela significativa da força de trabalho das classes econômicas mais baixas. Atualmente, é latente a preocupação com a redução da mão de obra disponível, por fatores como envelhecimento, maior nível de instrução da população ou desinteresse por atividades braçais pelos mais jovens. Nesse contexto, o real desafio passa a ser a readequação da força de trabalho nos processos relacionados à construção civil.

A sustentabilidade desse método construtivo tem avançado significativamente

nos últimos anos, impulsionada pelo desenvolvimento de produtos específicos para impressão 3D por grandes empresas. Esses produtos são projetados para atender às exigências de bombeabilidade, extrudabilidade e construtibilidade, considerando a reologia das pastas cimentícias. Portanto, hoje há uma gama de produtos disponíveis no mercado capazes de atender à demanda de desempenho desse processo, mas ainda se faz necessária a pesquisa por soluções sustentáveis mais acessíveis no mercado, principalmente aquelas que adotem em sua composição a incorporação de resíduos industriais, visando à redução do impacto ambiental gerado nos processos produtivos.

Com relação aos aspectos construtivos dessa tecnologia, como aparência das superfícies e integridade estrutural, são condicionantes inerentes a qualquer método construtivo e devem ser considerados e mitigados em conformidade com a demanda. Sendo assim, podem ser tratados como limitantes secundários ao uso da técnica.

Existem muitas variáveis envolvidas nesse processo construtivo, como matéria-prima, mão de obra especializada, tipos de equipamentos de impressão, variabilidade das bombas e dos bicos de impressão, caminho a ser percorrido e tempo aberto de

impressão. Assim como nas construções com concreto convencional, à medida que cada condicionante tenha seu impacto reduzido ou neutralizado, a produção em larga escala torna-se cada vez mais viável.

Dos desafios apresentados como limitadores da disseminação desse método construtivo, a regulamentação pode ser o entrave mais significativo. Em muitos países, inclusive o Brasil, esse tema tem sido largamente discutido e caminha-se, ainda que a passos curtos, para uma normatização dessa técnica, o que pode acelerar sua democratização.

Os problemas apresentados por esse método de construção ainda são consideráveis e a popularização desse processo perpassa pela superação desses desafios, inclusive culturais. Diversas pesquisas têm sido conduzidas com o objetivo de superar tais entraves, e resultados significativos tem sido alcançados, seja na produção dos materiais, seja na evolução dos equipamentos e sua logística ou ainda na aceitação do mercado e sua regulamentação.

Apesar de ser uma tecnologia recente, que teve seu início em 2014, a impressão 3D em concreto apresenta uma evolução significativa, podendo já ser considerada uma realidade e com potencial promissor para um futuro a curto prazo. ☺

► REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BAZLI, M.; ASHRAFI, H.; RAJABIPOUR, A.; KUTAY, C. 3D printing for remote housing: Benefits and challenges. *Automation in Construction*, 148, p. 104772, 2023/04/01/ 2023.
- [2] BODDEPALLI, U.; PANDA, B.; RANJANI GANDHI, I. S. Rheology and printability of Portland cement-based materials: a review. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 12, n. 7, p. 789-807, 2023.
- [3] BUSWELL, R. A.; LEAL DE SILVA, W. R.; JONES, S. Z.; DIRRENBURGER, J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, p. 37-49, 2018/10/01/ 2018.
- [4] HAGER, I.; GOLONKA, A.; PUTANOWICZ, R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*, 151, p. 292-299, 2016.
- [5] LE, T. T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*, 45, p. 1221-1232, 2012.
- [6] LNNANO, Laboratório Nacional de Nanotecnologia. <https://lnnano.cnpem.br/instalacoes/micro-e-nanofabricacao/microfabricacao/impressao-3d/>. Acesso em 10/02/2025.
- [7] NEWATLAS, Science, Tech & Innovation News. <https://newatlas.com/minibuilder-robots-3d-print-large-scale-structures/32573/>. Acesso em 25/04/2025.
- [8] RANJHA, S.; KULKARNI, A.; SANJAYAN, J., 3D Construction printing—a review with contemporary method of decarbonisation and cost benefit analysis. 1-11, 2018.
- [9] SANJAYAN, J. G.; NEMATOLLAHI, B.; XIA, M.; MARCHMENT, T. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and building materials*, 172, p. 468-475, 2018.
- [10] WANG, X.; LI, W.; GUO, Y.; KASHANI, A. et al. Concrete 3D printing technology for sustainable construction: A review on raw material, concrete type and performance. *Developments in the Built Environment*, 17, p. 100378, 2024/03/01/ 2024.
- [10] WU, P.; WANG, J.; WANG, X. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. *Automation in Construction*, 68, p. 21-31, 2016.
- [12] ŞAHİN, H. G.; MARDANI-AGHABAGLOU, A. Assessment of materials, design parameters and some properties of 3D printing concrete mixtures; a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 316, p. 125865, 2022/01/17/ 2022.