

RAISSA ALECRIM FERREIRA

**MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO CIVIL:  
ELEMENTOS DE CONCRETO**

São Paulo

2023

RAISSA ALECRIM FERREIRA

**MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO CIVIL:  
ELEMENTOS DE CONCRETO**

Monografia apresentada à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo,  
para obtenção do título de Especialista em  
Gestão de Projetos na Construção

Orientador:

Prof. Dr. Silvio Burrattino Melhado

São Paulo

2023

RAISSA ALECRIM FERREIRA

**MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO CIVIL:  
ELEMENTOS DE CONCRETO**

Data da aprovação: 25 / 10 / 2023

Nota: 9,0

Banca examinadora:

---

Orientador Prof. Dr. Silvio Burrattino Melhado

---

Prof. Dr. Eduardo Toledo Santos

---

Prof. Dr. Marcelo de Andrade Romero

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

#### Catálogo-na-publicação

Ferreira, Raissa Alecrim  
MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ELEMENTOS DE  
CONCRETO / R. A. Ferreira -- São Paulo, 2023.  
97 p.

Monografia (Especialização em Gestão de Projetos na Construção) - Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Manufatura Aditiva aplicada na construção civil I.Universidade de São  
Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos, primeiramente a Deus, Nosso Senhor Jesus Cristo, e à intercessão de Nossa Senhora, pelo dom da vida e pela minha formação como Arquiteta e Urbanista. Sou grata pelas graças que me foram concedidas para a realização deste trabalho e, agora, pela conquista do título de Especialista em Gestão de Projetos na Construção.

A meu esposo, companheiro e amigo Allan Barros, que sempre compreendeu o quão desafiadora é a jornada de equilibrar trabalho e estudo, me apoiando de maneira incondicional ao longo desta jornada. Obrigada pelo seu apoio e confiança, não me deixando desistir e sendo meu apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus amados pais, Ciro e Edna, que são os pilares do meu equilíbrio e os exemplos mais inspiradores da minha vida. Agradeço também aos meus queridos irmãos, Arthur e Clarissa, pela constante disponibilidade em me apoiar em todas as situações, tanto acadêmicas quanto pessoais. Quero dedicar um carinho especial à minha adorável sobrinha e afilhada, Clarinha, que mesmo sendo tão pequena, com apenas 2 meses, já possui o poder de impactar positivamente tantas vidas. Mal posso esperar para vê-la novamente e encher seu dia com colo e brincadeiras, estou com saudade. Expresso minha gratidão ao meu tio César, cujos ensinamentos e orientações têm sido fundamentais para a minha trajetória estudantil. O apoio deles é o que tornou tudo isso possível. São verdadeiras bênçãos em minha vida.

A todos os amigos e futuros especialistas em gestão de projetos na construção que fizeram parte dessa jornada ao longo destes anos, em especial Priscila, Marcela e Natalia. A presença de vocês e o apoio oferecido foram fundamentais para a minha formação, tornando essa trajetória muito mais leve e significativa.

A todo corpo docente da POLI USP, que que contribuíram de alguma forma para a obtenção do título de Especialista em Gestão de Projetos na Construção, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Silvio Melhado, pelo empenho e dedicação neste trabalho. Agradeço imensamente pelo carinho e disponibilidade durante essa jornada.

## RESUMO

A construção civil, desempenhando um papel crucial na economia global, contribui atualmente com cerca de 6% para o Produto Interno Bruto (PIB) mundial, e a previsão é de um crescimento para 14,7% até 2030. Apesar de sua relevância, o setor enfrenta desafios relacionados à produtividade e eficiência, ainda dependendo de métodos tradicionais e mão de obra intensiva. No entanto, a 4ª revolução industrial está transformando a indústria por meio da manufatura aditiva (impressão 3D). A manufatura aditiva permite a construção precisa e ágil de objetos tridimensionais por meio de camadas sucessivas, automatizando e digitalizando processos na construção civil. Essa abordagem promove maior eficiência, redução de custos, melhoria na qualidade do projeto e aumento da segurança. Além desses benefícios, a tecnologia 3D aditiva também demonstra compromisso com a sustentabilidade, minimizando o desperdício de materiais e as emissões de CO<sub>2</sub>. Apesar das perspectivas positivas, este trabalho reconhece obstáculos a serem superados, como custos iniciais elevados, escalabilidade, demanda por mão de obra qualificada e necessidade de normas específicas. Diversos métodos de impressão 3D são abordados, incluindo extrusão de material, jato de aglutinante, jateamento de material e moldagem contínua. Exemplos internacionais e nacionais de sucesso na aplicação da manufatura aditiva na construção são apresentados, demonstrando a viabilidade econômica e os benefícios ambientais da impressão 3D. Este trabalho aborda a aplicação da manufatura aditiva no campo da construção civil, com foco no uso do concreto. O objetivo é explorar essa tecnologia inovadora, destacando tanto os benefícios quanto as limitações, com um enfoque específico no uso do concreto. A pesquisa busca contribuir para a disseminação e aprimoramento da técnica, investigando conceitos já estabelecidos internacionalmente. Destina-se a profissionais, empresas e pesquisadores interessados em aproveitar o potencial da manufatura aditiva para criar estruturas de concreto mais eficientes, seguras e econômicas na indústria da construção civil.

**Palavras-chave:** Construção Civil. Manufatura Aditiva. Impressão 3D. Concreto. Eficiência. Tecnologia Inovadora. Automação. Redução de custos.

## ABSTRACT

Civil construction, playing a crucial role in the global economy, currently contributes around 6% to the worldwide Gross Domestic Product (GDP), with a projected growth to 14.7% by 2030. Despite its significance, the sector faces challenges related to productivity and efficiency, still relying on traditional methods and intensive labor. However, the 4th industrial revolution is reshaping the industry through additive manufacturing (3D printing). Additive manufacturing enables precise and agile construction of three-dimensional objects through successive layers, automating and digitizing processes in civil construction. This approach promotes greater efficiency, cost reduction, project quality improvement, and enhanced safety. In addition to these benefits, 3D technology also demonstrates a commitment to sustainability, minimizing material waste and CO2 emissions. Despite optimistic outlooks, this work acknowledges obstacles to overcome, such as high initial costs, scalability, demand for skilled labor, and the need for specific regulations. Various 3D printing methods are addressed, including material extrusion, binder jetting, material spraying, and continuous molding. Successful international and national examples of additive manufacturing application in construction are presented, showcasing the economic viability and environmental benefits of 3D printing. This work delves into the application of additive manufacturing in the field of civil construction, focusing on concrete usage. The objective is to explore this innovative technology, highlighting both the benefits and limitations, with a specific emphasis on concrete use. The research aims to contribute to the dissemination and enhancement of the technique, investigating concepts already established internationally. It is intended for professionals, companies, and researchers interested in harnessing the potential of additive manufacturing to create more efficient, secure, and cost-effective concrete structures in the construction industry.

**Keywords:** Civil Construction. Additive Manufacturing. 3D Printing. Concrete. Efficiency. Innovative Technology. Automation. Cost Reduction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tecnologia SLA (Stereolithography). .....	22
Figura 2 - SLS (Sinterização Seletiva a Laser).....	23
Figura 3 -Tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) .....	24
Figura 4- Impressora Darwin, produzida em 2008, pelo Dr. Adrian Bowyer.....	25
Figura 5- Impressora 3D Replicator 2 da marca.....	26
Figura 6- Captura de tela do site da ISO mostrando o status 'under development' do projeto ISO/ASTM FDIS 52939. ....	30
Figura 7- Processo de extrusão aditiva, que envolve a deposição de camadas de um material pré-misturado. C, A e W representam cimento, agregado e água, respectivamente. ....	32
Figura 8- (a e b) Tecnologia de Contour Crafting, desenvolvida na USC, mostrando dispositivo de raspagem e máquina de grande escala. C) ilustração da Tecnologia de Contour Crafting construindo uma casa. ....	34
Figura 9 - Esquema representativo do bico extrusor.....	35
Figura 10- Impressão 3DCP de peças de concreto utilizando uma impressora com pontes rolantes.....	38
Figura 11- Exemplo de componente horizontal fabricado na Universidade de Loughborough pela tecnologia 3DCP.....	39
Figura 12- Exemplos de estruturas construídas com a tecnologia por Jato aglutinante. ....	40
Figura 13- Esquema do processo de tecnologia de jato aglutinantes. C, W e A correspondem a cimento, água e agregado, respectivamente.....	41
Figura 14- Processo de Impressão 3D tecnologia -Shape.....	43
Figura 15- Plano de impressão de uma impressora D-Shape.....	44
Figura 16- Uma impressora D-Shape e um sistema em funcionamento. ....	45
Figura 17- Exemplos de construções em escala real de cada processo, (a) D-Shape, no canto superior esquerdo, (b) Contour Crafting, à direita, e (c) Concrete Printing, no canto inferior esquerdo.....	47
Figura 18- Banco construído com 3DCP, composto de 128 camadas, com reforço estrutural. ....	49

Figura 19- Esquema do processo de tecnologia de jateamento de material (“spraying”). C, W e A correspondem a cimento, água e agregado, respectivamente. ....	52
Figura 20- Shotcrete 3D Printing (SC3DP), desenvolvida por pesquisadores da Universidade Técnica de Braunschweig, na Alemanha. ....	53
Figura 21- Impressão 3D de Componentes de Concreto de Grande Formato com aplicação de acabamentos.....	54
Figura 22- Esquema do processo de moldagem contínua ("slipform"), o material pré-misturado é inserido na cabeça de impressão em movimento vertical, com a velocidade ajustada à cinética de endurecimento do concreto. C, W e A correspondem a cimento, água e agregado, respectivamente.....	55
Figura 23- Princípio do processo Smart Dynamic Casting: A) Concreto é preparado com um retardador de endurecimento; B) adição do acelerador de aderência; C e D) correspondem a um controle em linha da progressão da reologia, permitindo controlar a taxa de elevação das peças moldadas; E) endurecimento do formato pela colocação nas peças moldadas; .....	56
Figura 24- Exemplos de elementos produzidos com a técnica Smart Dynamic Casting. ....	57
Figura 25- Fachadas do edifício com cinco andares, na China.....	58
Figura 26- Ligas e reforços em aço prometem uma estrutura segura no edifício impresso em 3D; Parede impressa com tecnologia, camadas; à direita, foto interna do edifício: janelas foram embutidas nos apartamentos do edifício projetado pela empresa chinesa WinSun, respectivamente. ....	59
Figura 27- Espaço de Coworking do Hubic. ....	60
Figura 28- Maquinário do laboratório de Impressão 3D em Concreto. ....	60
Figura 29- Exemplos de objetos impressos em 3D no laboratório. À esquerda, o elemento mais alto impresso até o momento. ....	61
Figura 30- Impressora 3D em funcionamento. ....	62
Figura 31- Visita ao HubIC e ao DCLab. ....	63
Figura 32- A Vila: edifício mais alto do mundo impresso em 3D. ....	71
Figura 33- Fachadas da Vila, edifício impresso em 3D pela empresa Dar Al Arkan. ....	72
Figura 34- Ambientes internos da vila: salão espaçoso com várias de convivência. ....	73
Figura 35- Estrutura montada com maquinário da 3D COBOD INTERNACIONAL... ..	74
Figura 36- A vila durante o processo de construção. ....	75

Figura 37- Primeira casa impressa em 3D na Alemanha, recebeu o “Prêmio Alemão de Inovação” .....	76
Figura 38- Fachadas do Escritório do futuro projetado feito com MA.....	77
Figura 39- Planta Baixa do escritório do Futuro projetado por Killa Design. ....	78
Figura 40- Interior do escritório do futuro com mobiliário impresso em 3D. ....	79
Figura 41- Corte esquemático exemplificando sistema adotado para desempenho térmico. ....	80
Figura 42- Áreas de convivência versáteis e circulações internas. ....	81
Figura 43- Primeira casa construída em impressora 3D no Brasil. ....	82
Figura 44- Planta baixa da casa impressa pela Startup 3D Home Construction. ....	83
Figura 45- Casa impressa em 3D com tecnologia brasileira. ....	84
Figura 46- Obra na fase da extrusão do concreto. ....	85
Figura 47- Equipamento para impressão 3D utilizado.....	86
Figura 48- Casa concluída com equipamento de impressão 3D no RN.....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fluxograma da pesquisa. ....	20
Tabela 2- Classificação com base nos processos para manufatura aditiva de matriz cimentícia. ....	31
Tabela 3- Previsão de economia ao se utilizar o Contour Crafting.....	36
Tabela 4- Comparação entre Contour Crafting, 3D Concrete Printing Process e D-shape. ....	46
Tabela 5- Comparativo entre as atividades nas indústrias de manufatura aditiva e das atividades de construção tradicional. ....	64
Tabela 6- Análise SWOT da Manufatura aditiva aplicada a construção de elementos cimentícios. ....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
3DCP	Concrete Printing Process
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
BIM	Building Information Modeling
CC	Contour Crafting
CNC	Controle Numérico Computadorizado
DBV	Sociedade Alemã de Tecnologia do Concreto e da Construção
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
EBM	Electron Beam Melting
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet das Coisas
ISO	International Organization for Standardization
MA	Manufatura aditiva
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
RN	Rio Grande do Norte
SC3DP	Shotconcrete 3d Printing
SDC	Smart Dynamic Casting

SLA	Stereolithography Apparatus
SLS	Sinterização Seletiva a Laser
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
STL	Stereolithography
USC	Universidade do Sul da Califórnia
USP	Universidade de São Paulo

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1. Tema .....	17
1.2. Justificativa .....	17
1.3. Objetivos.....	18
1.3.1. Objetivo Geral .....	18
1.3.2. Objetivos Específicos .....	18
1.4. Metodologia .....	19
1.5. Estruturação do Trabalho .....	21
<b>2. MANUFATURA ADITIVA E SUAS NUANCES</b> .....	<b>22</b>
<b>3. A IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL</b> .....	<b>27</b>
3.1. Extrusão de material.....	32
3.1.1. Contour Crafting (CC) .....	33
3.1.2. 3D Concrete Printing (3DCP) .....	37
3.2. Jato de aglutinante .....	40
3.2.1. D-Shape .....	42
3.3. Comparativo das principais tecnologias .....	45
3.4. Métodos alternativos.....	51
3.4.1. Jateamento de Material.....	52
3.4.2. Moldagem contínua (Slipform) .....	54
<b>4. O CONCRETO IMPRESSO</b> .....	<b>58</b>
<b>5. A TECNOLOGIA TRIDIMENSIONAL NA PRÁTICA</b> .....	<b>69</b>
5.1. A Vila / Dar Al Arkan .....	70
5.2. Escritório do Futuro / Killa Design.....	77
5.3. Casa unifamiliar / 3D Home Construction.....	82
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>92</b>

## 1. INTRODUÇÃO

No cenário global, a indústria da construção civil desempenha um papel vital na economia, contribuindo atualmente com cerca de 6% do Produto Interno Bruto (PIB) universal, de acordo com o relatório publicado pelo Fórum Econômico Mundial, sob o tema "O Futuro da Construção" (WORLD ECONOMIC FORUM, 2018). As perspectivas futuras são ainda mais animadoras, com projeções apontando para alcançar 14,7% do PIB global até o ano de 2030. Essa expansão evidencia a relevância desse setor não apenas para o desenvolvimento econômico, mas também para o progresso social em todo o mundo. Contudo, mesmo com seu impacto substancial, a produtividade na indústria da construção, como apontado por Farmer (2016), ainda não atingiu seu potencial máximo e as preocupações relacionadas à eficiência continuam a ser um desafio em curso.

Diferentemente de diversos outros setores, a construção civil tem demonstrado uma menor agilidade na incorporação de novas tecnologias, muitas vezes preferindo abraçar abordagens tradicionais que dependem fortemente da mão de obra. Esta persistente associação da construção a métodos artesanais frequentemente resulta em um desempenho abaixo do esperado com desperdícios, custos elevados e problemas de qualidade (KHOSHNEVIS, 2004).

Entretanto, o cenário está começando a mudar com a ascensão da 4ª revolução industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Esta revolução representa um marco na história da tecnologia, que impulsiona uma transformação radical em várias indústrias, incluindo a construção civil. Ela é caracterizada ainda pela fusão de tecnologias digitais, físicas e biológicas, desencadeando avanços significativos em automação, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e muito mais.

Uma das facetas dessa revolução é o surgimento da manufatura aditiva (MA), também conhecida como prototipagem rápida ou impressão 3D, que representa um dos pilares de transformação da indústria da construção. Essa tecnologia revolucionária permite a produção de objetos tridimensionais empilhando materiais camada sobre camada, viabilizando a criação de estruturas complexas com precisão e rapidez. Assim, a manufatura aditiva é considerada uma das principais tecnologias

habilitadoras da Indústria 4.0, pois oferece a capacidade de produzir produtos altamente personalizados, funcionais e duráveis em larga escala. Sua aplicação se estende a diversas indústrias, incluindo a automotiva, aeroespacial e de saúde, como resposta à demanda por soluções mais eficazes e adaptáveis (FLORÊNCIO *et al.*, 2016).

Neste sentido, surge o conceito de Construção 4.0, que se refere à automação e digitalização de processos na construção civil por meio do uso de novas tecnologias e técnicas inovadoras de produção, como por exemplo a impressão 3D. O objetivo é aumentar a eficiência, reduzir atrasos e custos, melhorar a segurança, a eficiência de recursos e a qualidade dos projetos e processos (FLORÊNCIO *et al.*, 2016). Dessa forma, Construção 4.0 representa um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais, permitindo uma abordagem mais inteligente, integrada e sustentável, desde o planejamento até a conclusão do projeto.

Portanto, enquanto a construção tradicional frequentemente pode envolver processos manuais e recursos desperdiçados, a manufatura aditiva tem capacidade de oferecer uma abordagem mais eficiente, precisa e sustentável. Seu potencial para criar produtos sob medida e otimizados é especialmente promissor no setor da construção civil. Embora esta tecnologia já fosse utilizada em outros setores industriais, sua aplicação no ramo da construção só começou a ser explorada mais recentemente, em meados dos anos 2000. Desde então, vários estudos têm sido realizados para explorar as possibilidades da manufatura aditiva no setor, tanto no que se refere à produção de componentes pré-fabricados quanto para a construção *in loco* de estruturas inteiras.

Diante das inúmeras vantagens da implementação da prototipagem rápida na construção civil, observa-se a cada dia mais, grandes avanços em pesquisas e projetos que buscam a utilização da técnica do concreto produzidos por impressão 3D no setor construtivo. Todavia, percebe-se que ainda existem grandes oportunidades neste mercado, permitindo o surgimento e aprimoramento de técnicas, uma vez que o estudo do concreto para impressão 3D ainda é muito recente. À medida que essa tecnologia continua a amadurecer, espera-se que ela contribua significativamente para a transformação da indústria da construção, redefinindo a forma como estruturas são projetadas, construídas e utilizadas.

## **1.1. Tema**

O presente trabalho tem como tema a manufatura aditiva aplicada a área de estudo da construção civil, mais especificamente no que diz respeito ao uso do concreto.

## **1.2. Justificativa**

A escolha do tema deste Trabalho Final foi orientada por afinidades pessoais, tanto na qualidade de arquiteta e urbanista, quanto pelo interesse em explorar uma vertente inovadora no campo da construção civil: a manufatura aditiva. A construção civil sempre representou um campo de profundo interesse devido à sua capacidade de moldar o ambiente construído e impactar a qualidade de vida das pessoas. A manufatura aditiva, por sua vez, emerge como uma oportunidade para revolucionar a maneira como projetos e edifícios são materializados.

Na realidade atual, muitas das práticas construtivas tradicionais ainda dependem substancialmente da intervenção humana, o que pode resultar em desafios relacionados à produtividade e qualidade. Questões como desperdício de recursos, prazos apertados e retrabalhos são persistentes na indústria da construção. Portanto, a exploração da manufatura aditiva se apresenta como uma alternativa promissora para superar essas limitações, automatizando processos e garantindo maior precisão e eficiência.

É relevante destacar que o tema proposto é recente e ainda pouco explorado no campo da construção civil. Nesse sentido, o presente trabalho buscou investigar técnicas e conceitos já difundidos em outros países, com o propósito de contribuir para a disseminação da ideia e sua aceitação no mercado. Espera-se que esta pesquisa possa fornecer informações para profissionais da área de construção civil, empresas e pesquisadores interessados em explorar o potencial da manufatura aditiva na criação de estruturas de concreto mais eficientes, seguras e econômicas.

Com a realização deste trabalho, pretende-se não somente aprofundar a compreensão sobre as possibilidades da manufatura aditiva, mas também inspirar a adoção de práticas que possam melhorar significativamente a eficiência na indústria da construção. Ao compartilhar os resultados desta pesquisa, almeja-se que ela possa contribuir para um diálogo enriquecedor e para o avanço das tecnologias construtivas, alinhando-se aos desafios e demandas da sociedade contemporânea.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

O objetivo geral deste estudo é explanar o uso manufatura aditiva como uma tecnologia inovadora na construção civil, com foco específico no uso do concreto. Serão abordados aspectos teóricos e práticos do concreto na manufatura aditiva, destacando seus benefícios e limitações.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Contextualizar o cenário da manufatura aditiva na construção civil, tanto em nível nacional quanto global;
- Explanar as técnicas existentes e o uso da impressão tridimensional nas construções em concreto;
- Analisar as implicações, benefícios e desafios decorrentes da adoção da tecnologia de impressão 3D na indústria da construção civil, examinando as vantagens, impactos ambientais, melhorias na eficiência construtiva, qualidade das estruturas e quaisquer desvantagens associadas à sua implementação.

#### **1.4. Métodos de pesquisa**

Para a realização deste trabalho e conseqüente alcance dos objetivos nele determinados, foi adotada uma abordagem mista, envolvendo tanto a coleta de dados secundários quanto primários. A coleta de dados secundários foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica abrangente, que compreendeu a busca e análise de informações em sites eletrônicos, artigos, teses, dissertações, revistas especializadas e livros técnicos. Essa revisão teve como objetivo identificar e compilar informações relevantes sobre a manufatura aditiva e sua aplicação na construção civil. Além disso, foram realizados estudos sobre as técnicas e processos já desenvolvidos nesse campo, visando a compreensão abrangente dos desafios e oportunidades desse setor em constante evolução.

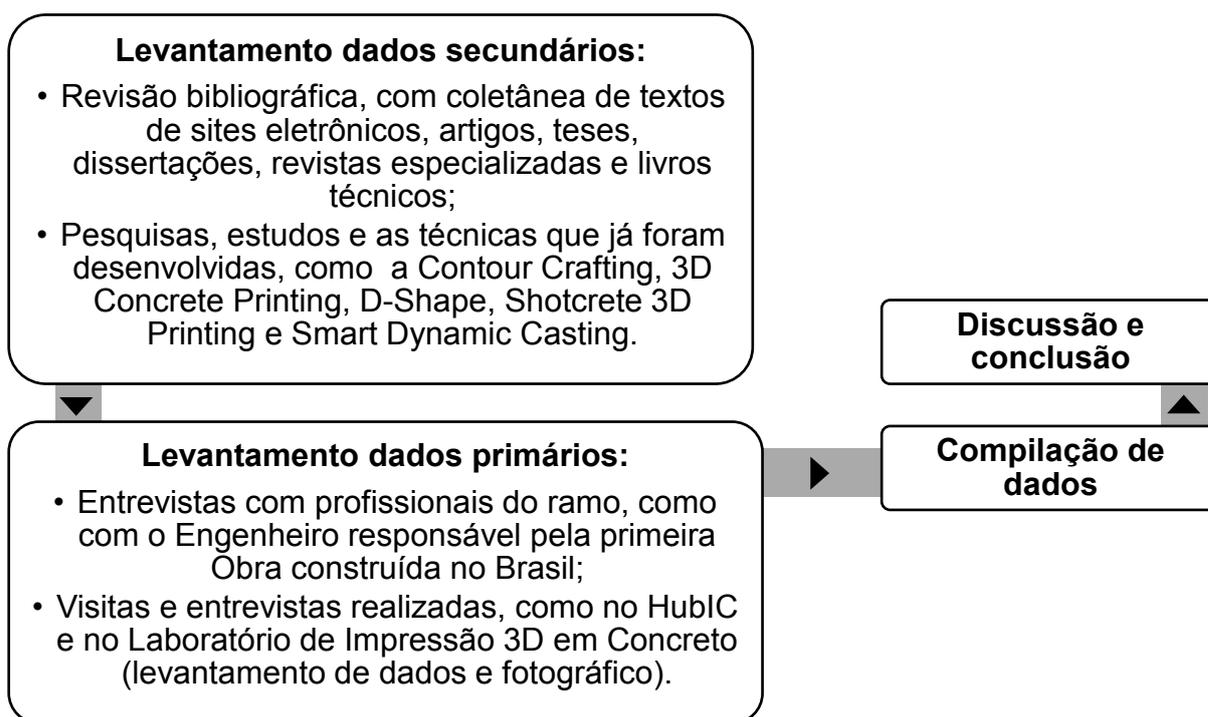
No mesmo contexto, também foram apresentados empreendimentos já construídos que utilizaram a metodologia aditiva, tanto no Brasil como em outras partes do mundo. Esses estudos têm o propósito de expor a eficácia e a aplicabilidade da tecnologia na prática, ao demonstrar exemplos concretos e validados de sua implementação em projetos reais.

Para a obtenção de dados primários, foram conduzidas entrevistas com profissionais da indústria da construção civil, incluindo arquitetos, engenheiros, empresários e outros especialistas do setor. O objetivo dessas entrevistas era coletar informações relevantes sobre a aplicação prática da manufatura aditiva, resultando em diversas perspectivas enriquecedoras sobre o assunto. Dentre elas, destaca-se a entrevista com o Engenheiro Allynson Aarão César Xavier, sócio da Startup 3D Home Construction, responsável pela construção da primeira casa construída no Brasil utilizando tecnologia de impressão 3D, conforme detalhado na página 81 do presente estudo. Sua contribuição foi particularmente significativa, pois forneceu informações práticas e experiências reais que enriqueceram a análise das vantagens, desafios e viabilidade da aplicação da manufatura aditiva na construção civil. As observações embasadas na experiência direta do Engenheiro não apenas ampliaram, mas também aprofundaram a compreensão do potencial transformador da manufatura aditiva na indústria da construção, incluindo insights sobre os processos, materiais utilizados e considerações práticas na implementação dessa tecnologia inovadora.

Para a realização deste trabalho, também foi realizada uma visita presencial ao Hubic, um espaço colaborativo focado em soluções *hardtech* e projetos pré-competitivos. Essa visita foi uma oportunidade única de interação direta com especialistas do Laboratório de Impressão 3D em Concreto, permitindo observar a tecnologia em ação e examinar os objetos já produzidos. Essa interação proporcionou uma compreensão mais profunda das aplicações práticas da impressão 3D na construção civil.

A adoção dessa abordagem mista possibilitou a obtenção de uma compreensão completa e abrangente da aplicação da manufatura aditiva na construção civil, abordando tanto os aspectos teóricos quanto as experiências práticas nesse campo, que enriqueceu a análise dos resultados e contribuiu para a obtenção de dados relevantes sobre o tema abordado neste estudo.

Tabela 1- Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Elaboração própria (2023).

## 1.5. Estruturação do Trabalho

Por último, com o intuito de exibir os resultados deste estudo, o trabalho aqui apresentado foi dividido em introdução, quatro capítulos centrais, conclusão e referências, abordando a aplicação da manufatura aditiva na construção civil, com foco em estruturas de concreto. A introdução contextualiza a relevância dessa abordagem na indústria da construção, estabelecendo os objetivos e a metodologia do estudo.

O segundo capítulo, "Manufatura Aditiva e Suas Nuances", aborda a evolução da impressão 3D desde o surgimento até sua popularização, destacando seu impacto em diversas indústrias. O capítulo seguinte, "A Impressão 3D na Construção Civil", aborda quatro tópicos distintos. O primeiro explora o processo de extrusão de material, o segundo detalha o jato de aglutinante, e o terceiro realiza uma comparação entre as principais tecnologias de impressão discutidas anteriormente. Já o último tópico apresenta métodos alternativos, como o jateamento de material e a moldagem contínua (Slipform), ampliando as possibilidades na construção de estruturas de concreto.

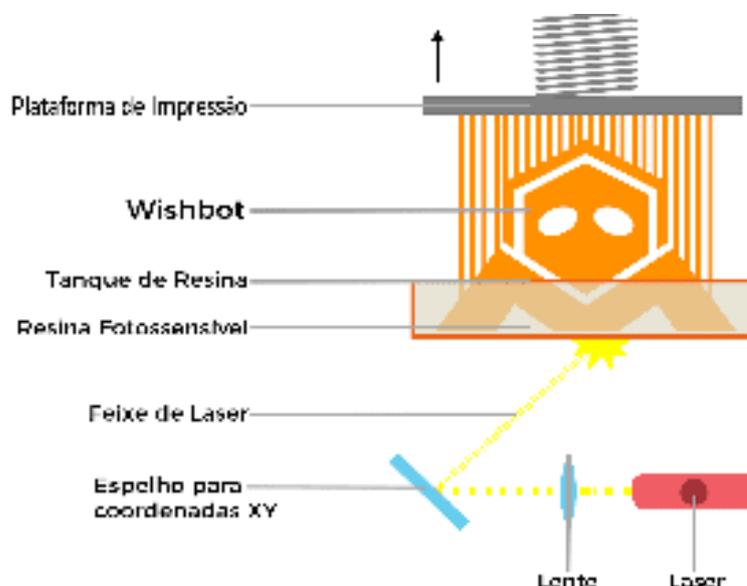
O Quarto Capítulo, "O Concreto Impresso", foca na aplicação da manufatura aditiva nesse setor, explorando como otimiza processos, reduz custos e aprimora a qualidade dos projetos. Assim, são analisadas vantagens, desafios práticos e viabilidade da adoção da impressão 3D na indústria da construção.

Finalmente, o capítulo "A Tecnologia Tridimensional na Prática" explora casos práticos que ilustram o impacto da impressão 3D na construção civil. São apresentados projetos como a "Vila / Dar Al Arkan", o "Escritório do Futuro / Killa Design" e a "Casa Unifamiliar / 3D Home Construction", destacando como a tecnologia está sendo aplicada de forma inovadora em diferentes partes do mundo.

## 2. MANUFATURA ADITIVA E SUAS NUANCES

A manufatura aditiva tem suas origens na década de 1980, quando o engenheiro Charles Hull, cofundador e diretor de tecnologia da 3D Systems, desenvolveu e patenteou a primeira tecnologia de impressão 3D comercializada, conhecida como estereolitografia (Stereolithography Apparatus - SLA). Esse processo revolucionário permitia a criação de objetos sólidos a partir do uso direcionado de um laser, que solidificava resinas líquidas em finas camadas (SCULPTEO, 2016).

Figura 1- Tecnologia SLA (Stereolithography).



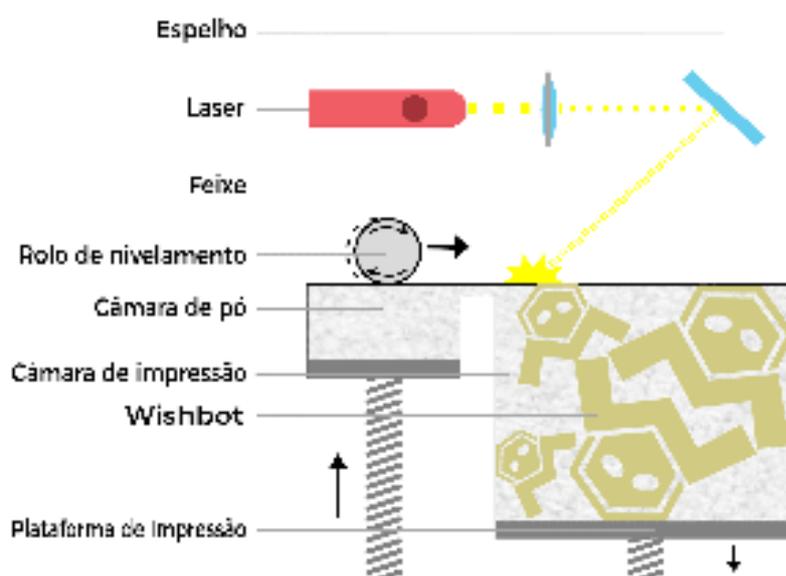
Fonte: WISHBOX TECHNOLOGIES (2020).

As contribuições de Hull foram cruciais para o desenvolvimento da tecnologia de impressão 3D. Em 1987, ele criou o formato de arquivo Stereolithography (STL), que se tornou um padrão na troca de dados em impressão 3D. Esse formato descreve objetos como coleções de triângulos, criando uma representação de malha. Além disso, Hull introduziu o conceito de fatiamento digital, simplificando a tarefa de impressão ao dividir um modelo 3D em camadas individuais, finas, geralmente horizontais, que são impressas uma sobre a outra. Adicionalmente, ele propôs o conceito de preenchimento, onde um material de suporte é inserido na peça durante o processo de impressão, garantindo sua estabilidade e economizando material e tempo (SCULPTEO, 2016).

Devido a essas inovações, Hull é amplamente reconhecido como um pioneiro da impressão 3D. No entanto, é fundamental reconhecer que muitos outros indivíduos e empresas também desempenharam papéis significativos no contínuo desenvolvimento dessa tecnologia ao longo dos anos. Essa colaboração coletiva tem sido fundamental para o impressionante avanço da manufatura aditiva desde suas origens nos anos 80 até a complexa e diversificada indústria que conhecemos hoje.

Por exemplo, em 1988, Carl Deckard, um pesquisador da Universidade do Texas, patenteou o método de Sinterização Seletiva a Laser (SLS), o qual utiliza um laser para fundir pós de plástico, metal ou cerâmica, resultando na criação do objeto desejado (figura 02). Na atualidade, esse método é usado principalmente para produzir peças de alta resistência e durabilidade, como peças automotivas e aeroespaciais.

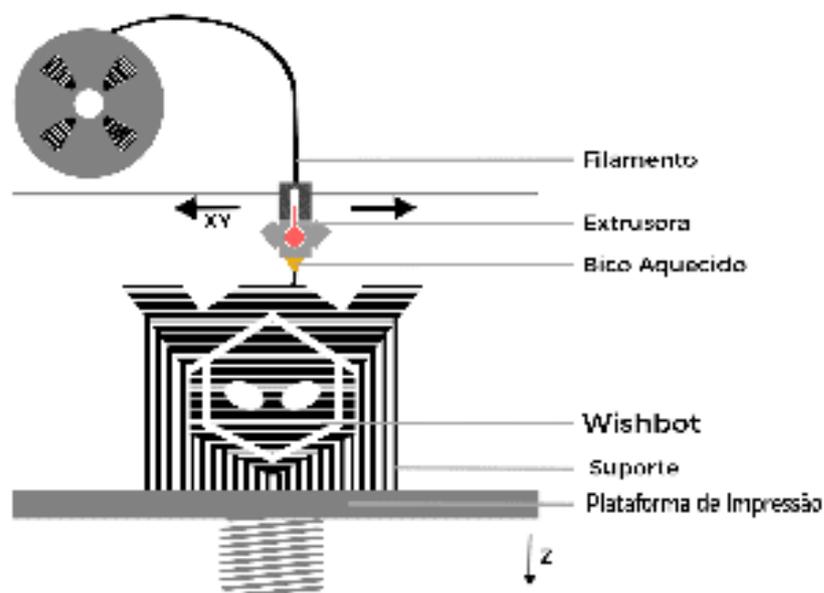
Figura 2 - SLS (Sinterização Seletiva a Laser).



Fonte: WISHBOX TECHNOLOGIES (2020).

Na mesma década, Scott Crump fundou a empresa Stratasys e desenvolveu a tecnologia de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), que permite a criação de objetos 3D a partir do depósito em camadas através de um bico que derrete e extrude filamentos de plástico, formando o objeto desejado (figura 03). A FDM é uma técnica popular de impressão 3D devido à sua facilidade de uso, versatilidade e custo acessível, sendo aplicada na produção de protótipos, peças industriais e até mesmo na impressão de alimentos e medicamentos (TURNER; STRONG; GOLD, 2014).

Figura 3 -Tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling)



Fonte: WISHBOX TECHNOLOGIES (2020).

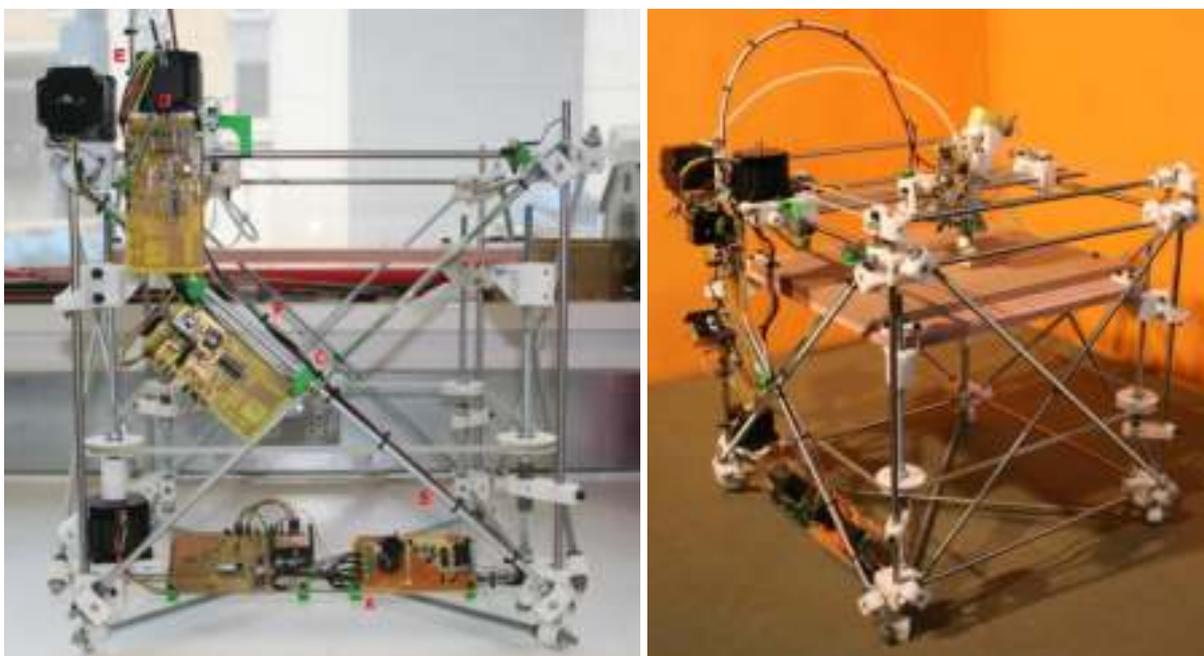
Desde as primeiras técnicas de impressão 3D, muitos avanços foram feitos na área, resultando em novos métodos e aprimoramentos dos existentes. Além dos métodos citados anteriormente, há outros menos comuns, como a deposição de material por jato de tinta (*Inkjet Printing*), no qual um material líquido é pulverizado em uma base para construir camadas; a impressão a laser em metal (*Direct Metal Laser Sintering - DMLS*), que utiliza um laser de alta potência para fundir camadas de pó metálico; a impressão por meio de um feixe de elétrons para fundir e solidificar pós metálicos (*Electron Beam Melting - EBM*), que utiliza um feixe de elétrons para fundir o material em pó; e a impressão 3D com materiais biológicos (*Bioprinting*), que utiliza células vivas para criar tecidos e órgãos. Cada método tem suas vantagens e desvantagens e é escolhido de acordo com o tipo de objeto a ser produzido e as necessidades específicas do projeto (TURNER; STRONG; GOLD, 2014; SCULPTEO, 2016).

Embora a MA tenha sido criada nas décadas de 1980 e 1990, foi no início dos anos 2000 que ela começou a ganhar projeção devido à crescente demanda da indústria por redução de custos, aumento da agilidade no desenvolvimento de produtos e produtos customizados (FLORÊNCIO *et al.*, 2016). Essa necessidade impulsionou a adoção da tecnologia de impressão 3D por empresas em todo o mundo,

resultando em uma rápida expansão que se tornou uma parte essencial da fabricação em diversos setores industriais.

Em 2005, o Dr. Adrian Bowyer lançou o projeto RepRap, uma iniciativa revolucionária de código aberto, que compartilhava informações e designs livremente com a comunidade. Esse projeto buscava a criação de uma impressora 3D capaz de autorreplicação, ou seja, de fabricar grande parte de suas próprias peças. Três anos após seu início, o projeto deu origem ao Darwin, uma impressora pioneira que se destacava por produzir suas próprias peças, marcando um avanço notável na impressão 3D (REPRAP, 2013).

Figura 4- Impressora Darwin, produzida em 2008, pelo Dr. Adrian Bowyer.



Fonte: REPRAP (2013).

Paralelamente, a empresa MakerBot, sediada em Nova York, desempenhou um papel fundamental na popularização das impressoras 3D. Em 2009, ela disponibilizou kits "Faça Você Mesmo" que permitiam aos consumidores montar suas próprias impressoras, marcando um passo significativo em direção à democratização da tecnologia. Em 2012, lançou o Replicator 2, uma máquina revolucionária com dimensões comparáveis às de uma impressora convencional, impulsionando a acessibilidade e a inovação na fabricação personalizada (SCULPTEO, 2016).

Figura 5- Impressora 3D Replicator 2 da marca.



Fonte: MAKERBOT (2013).

Várias transformações surgiram visando democratizar o uso desta tecnologia, tornando-a viável para diversas indústrias, incluindo a construção civil. Esse setor ainda tem muito a evoluir em termos de desenvolvimento tecnológico, porém possui potencial para revolucionar a forma como os projetos são concebidos, planejados e construídos.

Portanto, a tecnologia de modelagem aditiva pode trazer diversas inovações para a indústria da construção civil, possibilitando a fabricação de componentes estruturais e elementos decorativos de maneira rápida, eficiente e econômica. Além disso, a utilização do concreto tem sido amplamente explorada, permitindo a criação de estruturas complexas e personalizadas, assim como a fabricação de peças com geometrias que seriam difíceis ou impossíveis de se produzir com métodos tradicionais.

### 3. A IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

No decorrer do século XX, a indústria da construção civil passou por mudanças graças as novas abordagens no design, nos materiais e na engenharia. Uma das maiores transformações foi o avanço tecnológico no uso do concreto que trouxe grandes vantagens para a arquitetura moderna. Hoje em dia, o concreto permanece como um dos materiais mais utilizados na construção civil, desempenhando um papel essencial tanto em edifícios simples quanto em estruturas mais complexas e inovadoras (FLORÊNCIO *et al.*, 2016).

Esta preferência é resultado direto das características naturais do concreto em si. Dentre esses atributos, podemos destacar sua ampla disponibilidade como matéria-prima em todo o mundo, a facilidade relativa de processamento que oferece e outras qualidades notáveis do cimento, tais como sua durabilidade excepcional e resistência a diferentes condições ambientais.

Os avanços contínuos na tecnologia e na indústria, combinados com melhorias constantes nas técnicas de design e fabricação assistidas por computador, estão desempenhando um papel crucial na criação de estruturas arquitetônicas feitas de concreto cada vez mais inovadoras. Todavia, quando se trata do setor da construção, a preferência por formas simples no concreto é em grande parte motivada pela praticidade e economia proporcionadas pelos moldes tradicionais. Moldes mais elaborados podem sair caros e demandar mais tempo, o que muitas vezes resulta em cronogramas mais longos e custos adicionais consideráveis (LLORET *et al.*, 2015).

Dessa forma, a predominância de elementos retos, como paredes, colunas e lajes, ocorre justamente porque essas formas são mais fáceis de criar e reutilizar, além de serem capazes de suportar cargas estruturais de maneira durável e acessível. No entanto, essa abordagem convencional, embora eficiente, por vezes pode restringir o potencial criativo do design arquitetônico. Aqui é onde a manufatura aditiva entra em cena, desafiando esse cenário. Ela viabiliza métodos construtivos mais ágeis e flexíveis, eliminando a dependência de moldes tradicionais. Conseqüentemente, essa revolução gradualmente desbloqueia novas possibilidades para formas arquitetônicas mais complexas e personalizadas, superando limitações anteriores e fomentando a

expressão ousada da criatividade na arquitetura contemporânea (BUSWELL *et al.*, 2018).

Como já mencionado, a técnica de impressão em materiais de matriz cimentícia, conhecida como impressão 3D de concreto, representa uma abordagem revolucionária na indústria da construção, ao abolir a necessidade de moldes convencionais. Nesse procedimento, há uma adição precisa e controlada por um software, de volumes específicos de material, em camadas planas sequenciais, para a criação dos elementos estruturais em concreto. A automação em maior parte desse processo é executada principalmente por máquinas, conferindo à construção uma grande eficiência e excelência na qualidade dos resultados obtidos (KHOSHNEVIS, 2004; LIM *et al.*, 2012).

Esse processo de impressão 3D cimentício abrange uma série de etapas cruciais para transformar um modelo digital em uma estrutura física. Tudo começa pela criação de um modelo tridimensional da estrutura por meio de um software de modelagem 3D. No mercado atual, há uma ampla variedade de opções de software disponíveis para essa finalidade. É fundamental que esse modelo seja compatível com todos os projetos complementares e esteja em conformidade com os formatos de arquivo apropriados, como STL (*Stereolithography*), IFC (*Industry Foundation Classes*) ou um formato de arquivo semelhante que contém informações sobre a geometria tridimensional do objeto a ser impresso, uma vez que o próximo passo envolve a conversão do modelo 3D para um desses formatos específicos (DING; WEI; CHE, 2014).

No contexto da manufatura aditiva convencional, o formato de arquivo STL é amplamente utilizado e compatível com a maioria dos softwares de modelagem e impressoras 3D. No entanto, de acordo com Ding, Wei e Che (2014), esse formato não é recomendado para a impressão 3D de concreto devido às limitações relacionadas a materiais, geometrias e a falta de informações sobre cor, textura e propriedades físicas do objeto, além de não permitir interações entre processos. Essas restrições dificultam a comunicação e a compatibilidade de arquivos entre diferentes profissionais envolvidos no sistema construtivo. Em contrapartida, o formato IFC, originado do processo BIM (*Building Information Modeling*), não só facilita a integração de impressão 3D em projetos de construção, promovendo a colaboração

entre profissionais e contribuindo para o controle de qualidade, como também incorpora semântica, fornecendo informações detalhadas sobre os componentes (DING; WEI; CHE, 2014; SMARSLY *et al.*, 2020).

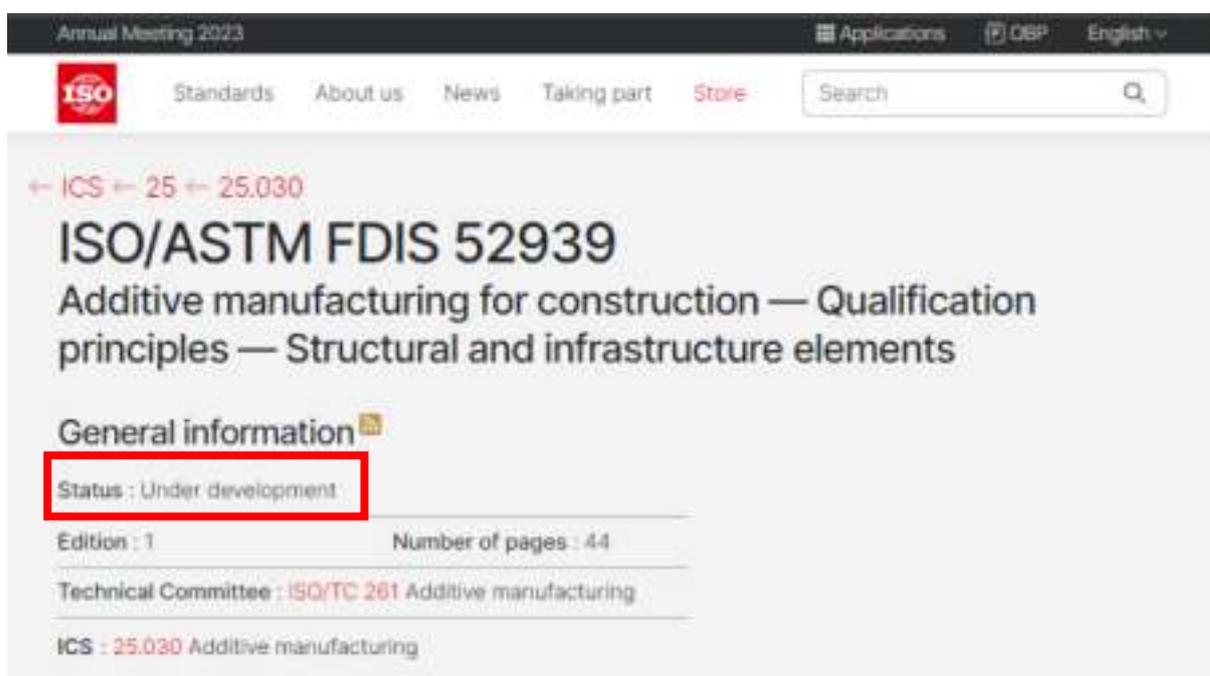
Após a fase de modelagem e conversão para o formato adequado, o próximo passo é a preparação para a impressão e o processo de fatiamento. Nesse estágio, o software de fatiamento divide o modelo 3D em camadas horizontais finas, geralmente com alguns milímetros de espessura. Cada camada representa uma fatia do objeto a ser impresso. Além disso, o software configura parâmetros essenciais, como a velocidade dos motores e as temperaturas necessárias para a impressão. Com as camadas devidamente definidas, o software de fatiamento gera o código de impressão. Esse arquivo contém comandos numéricos detalhados para operar a máquina de impressão 3D e, assim, permite a impressão do objeto (VOLPATO; CARVALHO, 2017).

No tocante à classificação das diversas tecnologias aditivas, a norma NBR 52900, estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é responsável por definir e estabelecer os termos empregados na tecnologia de manufatura aditiva. No entanto, é importante ressaltar que essa norma possui uma aplicabilidade abrangente, englobando todas as técnicas e materiais utilizados na prototipagem rápida, e não apenas materiais à base de cimento. Isso ressalta a importância de desenvolver uma norma específica para a construção civil e, conseqüentemente, o concreto, tendo em vista as particularidades dos materiais cimentícios que requerem considerações específicas, como as propriedades mecânicas, durabilidade e outros fatores fundamentais.

Visando atender às demandas da indústria da construção 3D de maneira adequada, está em processo de desenvolvimento a norma específica voltada para manufatura aditiva na construção, a ISO/ASTM FDIS 52939, evidenciando o compromisso com a evolução das tecnologias e práticas construtivas. O projeto de norma está sendo desenvolvido pelas organizações International Organization for Standardization (ISO) e American Society for Testing and Materials (ASTM). Seu objetivo é estabelecer princípios da Manufatura Aditiva para a Construção, especialmente no que diz respeito aos Princípios de Qualificação, Elementos Estruturais e de Infraestrutura. No momento, o status do projeto indica que ele ainda

está em desenvolvimento, caracterizado pelo termo "FDIS". Isso significa que se trata de um Projeto Final de Norma Internacional, e os especialistas estão trabalhando para finalizar o texto da norma antes de submetê-lo à votação pelos membros das organizações envolvidas. Uma vez aprovado, o documento se tornará um padrão oficial, fornecendo orientações para a indústria sobre a aplicação da manufatura aditiva na construção.

Figura 6- Captura de tela do site da ISO mostrando o status 'under development' do projeto ISO/ASTM FDIS 52939.

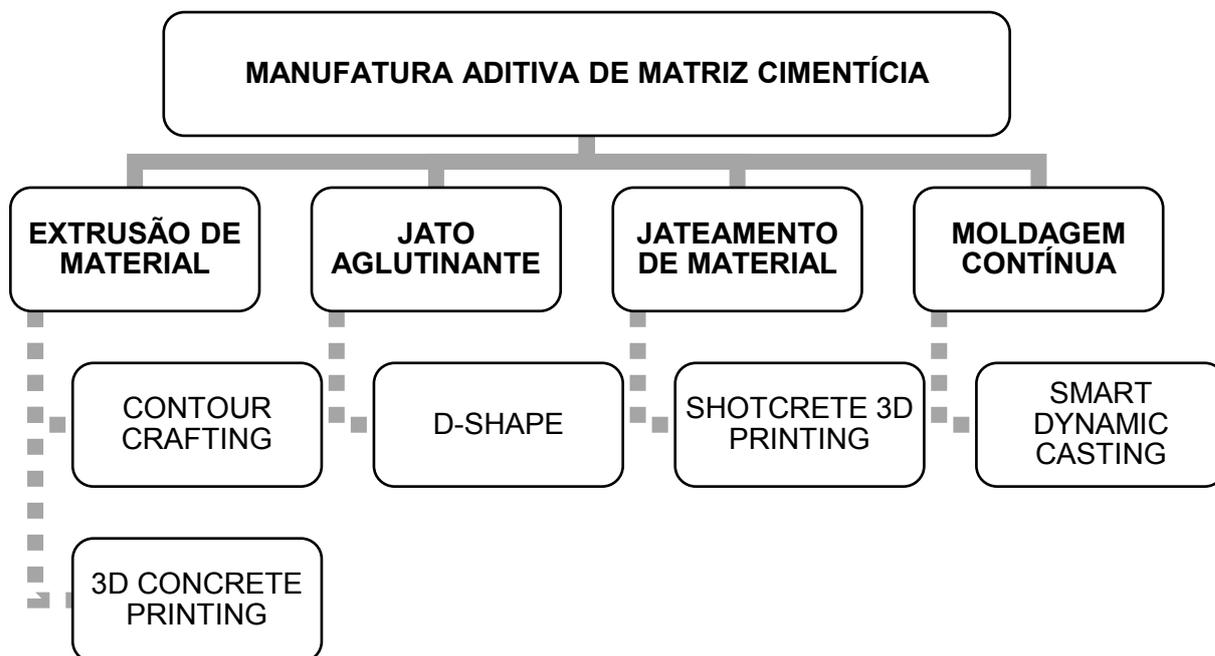


Fonte: Adaptado de ISO (2023).

Dado o estágio atual do cenário normativo, neste trabalho, será adotado como referência a classificação proposta pela Sociedade Alemã de Tecnologia do Concreto e da Construção (DBV). Esta categorização classifica os métodos de modelagem aditiva com base nos processos envolvidos, quais sejam, extrusão de material, jato de aglutinante, jateamento de material e o método de moldagem contínua, conhecido como "slipform" em inglês (tabela 04).

Cada um desses métodos apresenta características únicas e aplicações específicas na manufatura aditiva de materiais cimentícios, contribuindo para uma visão abrangente das tecnologias disponíveis e em desenvolvimento.

Tabela 2- Classificação com base nos processos para manufatura aditiva de matriz cimentícia.



Fonte: Adaptado de VASILIC (2020).

Essa classificação ajuda na compreensão das diversas abordagens adotadas na impressão 3D. Ao categorizar os métodos de acordo com suas características e processos específicos, ela oferece uma visão mais clara das diferentes maneiras de realizar a impressão 3D, além de possibilitar uma análise mais organizada das abordagens empregadas. Isso contribui significativamente para a compreensão geral das tecnologias de manufatura aditiva e ajuda a orientar decisões e pesquisas futuras na área.

Por outro lado, é amplamente reconhecido que diversas tecnologias de fabricação aditiva voltadas para o concreto estão em constante desenvolvimento em todo o mundo. Contudo, é relevante destacar que, segundo Buswell (2018), existem mais de 30 técnicas e tecnologias que estão sendo desenvolvidas digitalmente nesse contexto. Assim, com o intuito de delinear o escopo deste estudo, optou-se por direcionar o foco apenas para os métodos mais reconhecidos e consolidados tanto em âmbito global quanto nacional. Essa abordagem permitiu uma análise detalhada dos métodos que se destacaram por sua disseminação e aceitação generalizada. Ao se concentrar nessas tecnologias bem estabelecidas, foi possível investigar de forma mais aprofundada os princípios essenciais e as características distintivas,

proporcionando uma base sólida para analisar as diferenças entre as diversas abordagens.

### 3.1. Extrusão de material

No que se refere à extrusão de concreto, é um dos métodos amplamente empregados e bem estabelecidos na tecnologia de impressão 3D na construção. De acordo com a NBR 52900, de forma geral, essa abordagem é classificada como uma forma de Manufatura Aditiva (MA) na qual o material é depositado por meio de um bico extrusor ou orifício. De maneira simplificada, a extrusão envolve a aplicação gradual de material cimentício através de um bico, que se sobrepõe ao seguir um trajeto predefinido pela modelagem computacional. Com esse processo, um objeto é construído gradualmente em camadas, semelhante à operação de uma impressora 3D convencional de plástico que utiliza a técnica de Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM).

Figura 7- Processo de extrusão aditiva, que envolve a deposição de camadas de um material pré-misturado. C, A e W representam cimento, agregado e água, respectivamente.



Fonte: GÜLLE; SELÇUK (2022).

A impressão por extrusão oferece a capacidade de construir estruturas diretamente no local, eliminando a necessidade de moldes. Isso é viabilizado pelas características dos equipamentos utilizados, que geralmente incluem impressoras de

grande porte. Existem dois tipos principais: impressoras do tipo portal, onde uma cabeça de impressão é controlada em três eixos sobre uma estrutura retangular fixa e robôs com braços mecânicos que normalmente possuem graus de liberdade translacionais e rotacionais. Essa flexibilidade possibilita a construção gradual das camadas, inclusive em locais permanentes ou de difícil acesso, ampliando significativamente as possibilidades de aplicação dessa tecnologia inovadora de impressão por extrusão (GÜLLE; SELÇUK, 2022).

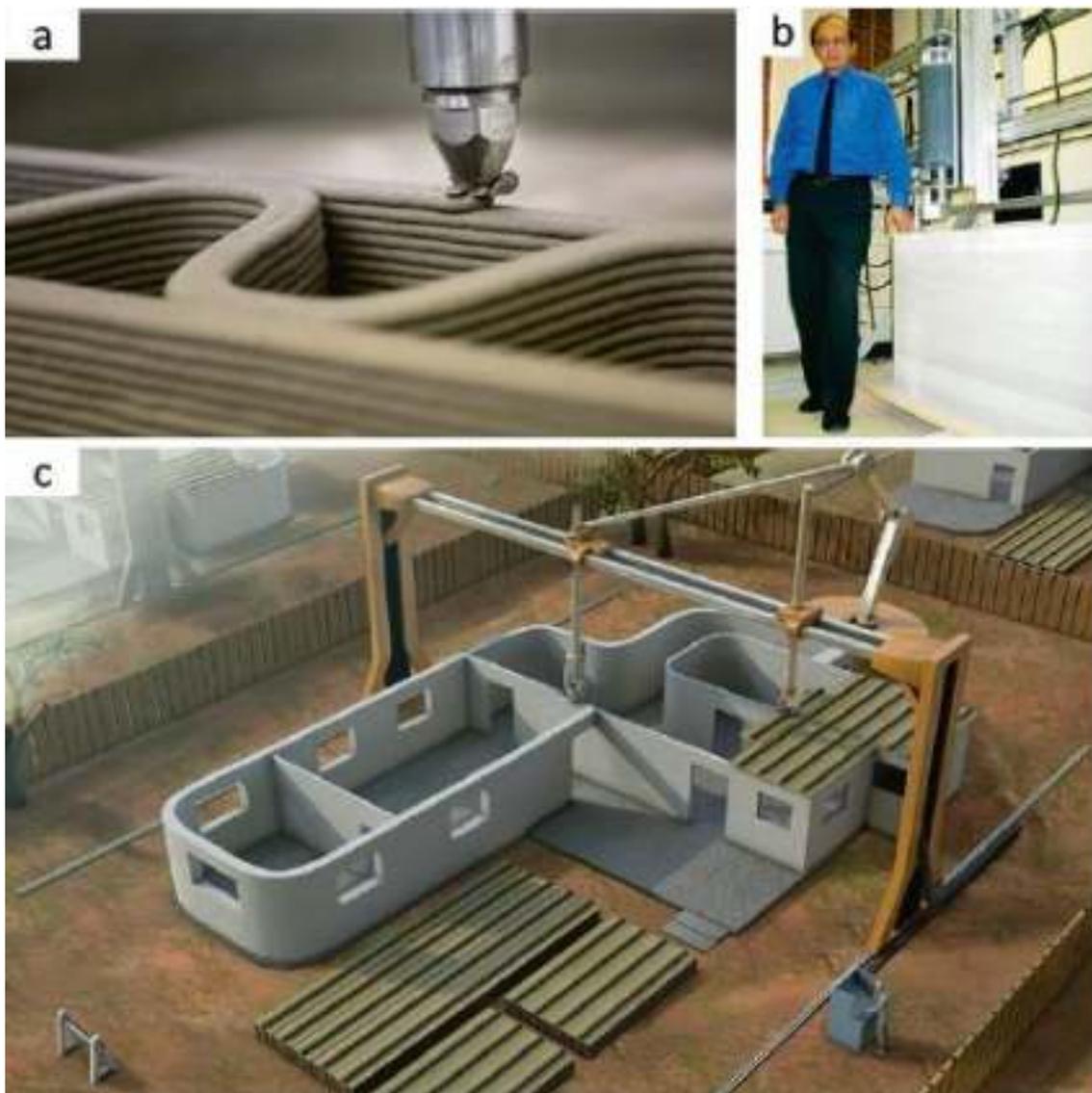
No entanto, é importante observar que a escalabilidade desse método pode ser mais limitada em comparação com os métodos construtivos tradicionais, sendo um aspecto que está constantemente sob estudo para possíveis avanços e aprimoramentos. Portanto, a extrusão de concreto na impressão 3D é uma técnica que oferece vantagens notáveis, mas também apresenta desafios que a pesquisa contínua busca resolver.

Dessa forma, diferentes tecnologias vêm sendo desenvolvidas em nível mundial e nacional. Dentre elas, as que mais avançaram e já alcançaram maturidade suficiente para imprimir casas e outras estruturas arquitetônicas, são: o método americano, chamado *Contour Crafting* (CC), da University of Southern Califórnia e o inglês, *Concrete Printing Process* ou simplesmente 3DCP, da Loughborough University.

### **3.1.1. Contour Crafting (CC)**

O Contour Crafting (CC), uma tecnologia inovadora de fabricação aditiva, representa um verdadeiro avanço no campo da construção. Desenvolvida na Universidade do Sul da Califórnia (USC) pelo professor Behrokh Khoshnevis e sua equipe, esse método patentado utiliza a extrusão em camadas para automatizar a construção de estruturas complexas de maneira ágil e eficiente, permitindo a criação completa de estruturas com uso de uma máquina robótica que extruda camadas de concreto, controlada por um projeto digital tridimensional. O processo envolve a extrusão precisa da argamassa de cimento por um braço mecânico, seguindo exatamente as especificações do projeto (LIM *et al.*, 2012).

Figura 8- (a e b) Tecnologia de Contour Crafting, desenvolvida na USC, mostrando dispositivo de raspagem e máquina de grande escala. C) ilustração da Tecnologia de Contour Crafting construindo uma casa.

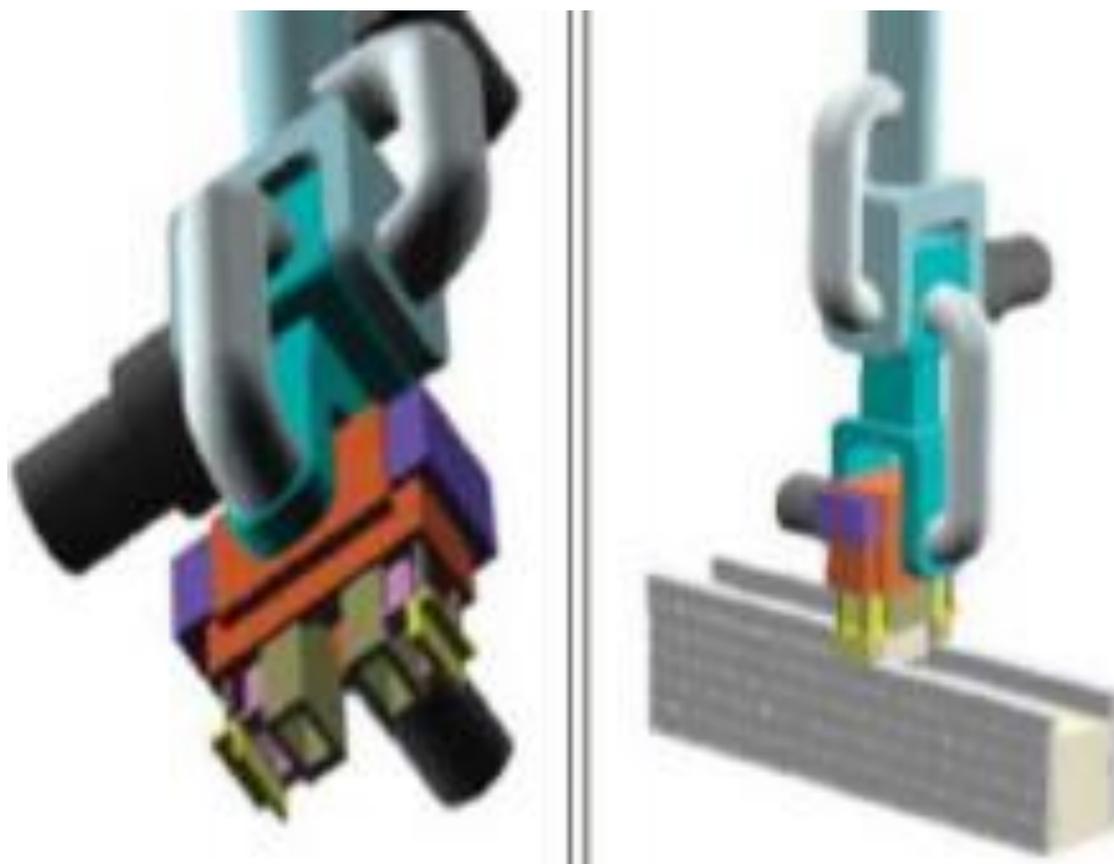


Fonte: CONTOUR CRAFTING (2020).

A metodologia CC apresenta uma taxa de construção de aproximadamente 3 minutos por metro quadrado, exigindo poucos funcionários para operação. Começando com um projeto tridimensional, o concreto é preparado ao ser misturado com aditivos especiais. Então, a máquina robótica, equipada com um bico extrusor, realiza a construção depositando camadas controladas desse material, movendo-se nos eixos X, Y e Z. Durante a construção, é possível incorporar manualmente componentes como encanamentos e fiação elétrica. Após a conclusão da impressão, a estrutura passa por um processo de cura e solidificação (KHOSHNEVIS, 2004).

O bico de impressão desta tecnologia possui duas saídas distintas: uma externa, dedicada à extrusão do contorno da peça, e outra interna, destinada ao preenchimento (KHOSHNEVIS, 2004). Essa configuração permite a criação de estruturas com múltiplas finalidades, possibilitando a extrusão simultânea de diferentes materiais, por exemplo, enquanto o núcleo é preenchido com a mistura de concreto, o acabamento externo é realizado com gesso. Logo, o CC combina o processo de extrusão de material com o preenchimento interno das paredes, com um foco particular na geração de elementos verticais, predominantemente por compressão. Isso resulta na redução da necessidade de estruturas adicionais para sustentar as saliências criadas. Em situações que demandem aberturas para portas ou janelas, vigas são inseridas para cobrir os vãos, permitindo que a parede seja construída acima, solucionando assim a questão do balanço (LIM *et al.*, 2012).

Figura 9 - Esquema representativo do bico extrusor.



Fonte: KHOSHNEVIS (2004).

Essa técnica possibilita a criação precisa de formas arquitetônicas e estruturas personalizadas de maneira automatizada, reduzindo significativamente o trabalho manual e minimizando os desperdícios frequentemente associados aos métodos

tradicionais de construção. A versatilidade da máquina torna sua aplicação viável tanto em ambientes controlados, como fábricas e laboratórios, quanto em canteiros de obras, adaptando-se às condições reais do local de construção, inclusive as intempéries. Além dos benefícios evidentes, como a redução de custos e aceleração da construção, a metodologia *Contour Crafting* proporciona maior flexibilidade no design arquitetônico e contribui para um ambiente seguro e sustentável. A diminuição da interação entre o canteiro de obras e a mão de obra também leva a uma redução nos acidentes de trabalho, promovendo um ambiente laboral mais seguro e diminuindo os custos associados a esses incidentes.

A capacidade de operar em locais de difícil acesso ou ambientes hostis é uma característica proeminente da tecnologia, conferindo-lhe notável versatilidade. O impacto do *Contour Crafting* na indústria da construção civil é significativo, permitindo a realização de projetos arquitetônicos inovadores. Isso é claramente ilustrado pelo quadro abaixo, que destaca as economias esperadas ao utilizar essa técnica desenvolvida por Khoshnevis, em comparação com o modelo convencional de construção.

Tabela 3- Previsão de economia ao se utilizar o Contour Crafting.

<b>PARCELA DE CUSTO DA CONSTRUÇÃO CONVENCIONAL</b>	<b>DEVIDO A</b>	<b>SE AUTOMATIZADO PELA CONTOUR CRAFTING</b>
20%- 25%	Financiamento	O curto prazo do projeto e o controle do tempo de lançamento no mercado reduzirão drasticamente os custos de financiamento.
25%-30%	Materiais	Não haverá desperdício na construção.
45%-55%	Mão de Obra	O trabalho manual será significativamente reduzido. A força muscular será substituída pelo poder do cérebro.

Fonte: Adaptado de CONTOUR CRAFTING CORPORATION (2017).

### 3.1.2. 3D Concrete Printing (3DCP)

Inspirada pela técnica de Khoshnevis, a tecnologia conhecida como 3D *Concrete Printing* (3DCP) foi desenvolvida pela Universidade de Loughborough, na Inglaterra. Ela compartilha semelhanças com a abordagem da Contour Crafting, baseando-se na técnica de extrusão para a criação de estruturas em concreto.

O funcionamento detalhado desse método segue um processo semelhante ao da CC. O processo começa pela criação de um modelo digital tridimensional da estrutura desejada por meio de software de modelagem. Em seguida, uma mistura de concreto é formulada para atender às necessidades específicas da impressão, considerando características como fluidez e resistência. A etapa subsequente envolve a deposição controlada de concreto de alta resistência, realizada por meio de um bico de extrusão acoplado a eixos com movimentação XYZ, controlados por computador (FLORENCIO *et al.*, 2016). Isso possibilita posicionar o concreto com precisão no local desejado. Após a impressão, o concreto passa por um processo de cura controlada para garantir a resistência adequada. A fase final pode incluir acabamentos superficiais, como polimento, ou tratamentos adicionais, como a incorporação de fibras na mistura, que tem o propósito de aprimorar as propriedades mecânicas dos objetos produzidos.

A máquina empregada na extrusão da mistura de concreto tem dimensões aproximadas de 6 metros de largura por 6 metros de altura e está equipada com uma cabeça de impressão móvel. O bocal da impressora permite a extrusão do material, o qual é impulsionado por uma bomba acoplada a um caminhão betoneira (YOSSEF; CHEN, 2015). O processo de construção de cada camada ocorre de maneira sequencial, empregando um concreto de alto desempenho enriquecido com aditivos, visando conferir resistência e trabalhabilidade à mistura. Essa metodologia de deposição camada por camada viabiliza um controle mais preciso das geometrias tanto internas quanto externas, proporcionando maior liberdade no âmbito da construção tridimensional.

Figura 10- Impressão 3DCP de peças de concreto utilizando uma impressora com pontes rolantes.



Fonte: LIM et al. (2012).

Ao contrário da Contour Crafting, o Concrete Printing Process (3DCP) se destaca principalmente por sua capacidade de acabamento. A camada de pasta cimentícia depositada tem uma espessura menor permitindo um controle mais refinado no acabamento de superfícies com geometrias complexas. Isso resulta em um nível de controle superior sobre o produto final e uma maior liberdade geométrica.

Uma das características notáveis do 3DCP é a ampla gama de possibilidades projetuais que oferece. Sua maquinaria flexível permite a construção industrial de diversas formas distintas, proporcionando uma flexibilidade formal sem precedentes. A personalização é um destaque, permitindo a criação de designs arquitetônicos altamente customizados. Além disso, a rapidez na execução é notável, com a capacidade de reduzir significativamente o tempo de construção de partes do projeto. A tecnologia também contribui para a redução do desperdício de material, uma vez que o concreto é depositado apenas onde necessário.

Figura 11- Exemplo de componente horizontal fabricado na Universidade de Loughborough pela tecnologia 3DCP.



Fonte: BUSWELL (2018).

No entanto, como qualquer tecnologia, o Concrete Printing Process também apresenta desafios. Os custos iniciais, incluindo investimentos em equipamentos e pesquisa, podem ser substanciais. Além disso, a limitação de tamanho da impressora pode restringir as dimensões das estruturas que podem ser criadas.

No contexto da gestão e dos custos de uma obra, a implementação do 3DCP pode trazer melhorias significativas. A eficiência temporal também é aumentada devido à construção automatizada e mais rápida, encurtando prazos de conclusão do projeto. A redução da necessidade de mão de obra intensiva, juntamente com a execução eficiente de designs personalizados, contribui para a otimização de recursos e redução de retrabalho. Ademais, a tecnologia diminui a dependência de habilidades especializadas, tornando a equipe de construção mais flexível. Em resumo, o Concrete Printing Process tem o potencial de transformar positivamente a indústria da construção, embora a sua adoção plena ainda esteja evoluindo.

### 3.2. Jato de aglutinante

Dentro do contexto da modelagem aditiva, especialmente no campo da utilização do concreto, para além da já mencionada técnica de extrusão, é fundamental destacar outros processos que merecem atenção, sendo o Jato de Aglutinante um deles. Conhecido também pelo termo em inglês "binder jetting, powder bed print, particle-bed 3D printing ou sand print", esse método tem conquistado reconhecimento crescente.

Figura 12- Exemplos de estruturas construídas com a tecnologia por Jato aglutinante.



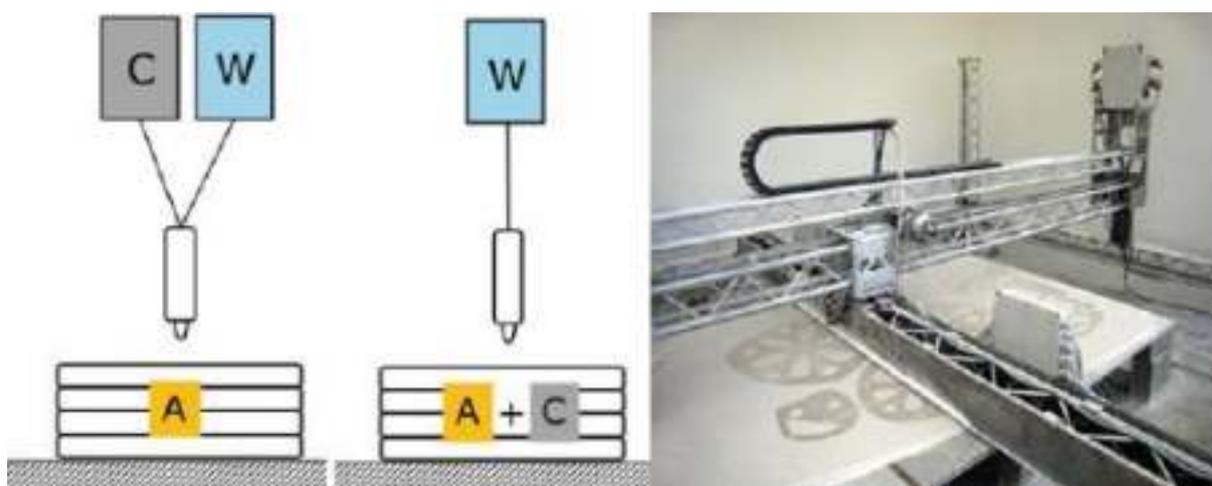
Fonte: PATEL (2019).

A norma brasileira NBR 52900 classifica esse processo como uma abordagem de Manufatura Aditiva, em que um agente de ligação líquido é seletivamente depositado para unir materiais em pó. A essência desse método reside na criação de objetos tridimensionais por meio da aplicação seletiva de um aglutinante líquido sobre uma camada de material em pó.

Nesse procedimento, uma camada de material em pó é distribuída, e as partículas resultantes se unem seletivamente por meio da aplicação precisa de um

aglutinante. Um bico de impressão em movimento controla essa deposição, camada por camada, direcionando a mistura de forma seletiva sobre as partículas. O processo se repete com a superposição de camadas, construindo assim o objeto tridimensional, comandado por instruções provenientes de um computador (LOWKE *et al.*, 2018; TAY *et al.*, 2018).

Figura 13- Esquema do processo de tecnologia de jato aglutinantes. C, W e A correspondem a cimento, água e agregado, respectivamente.



Fonte: GÜLLE; SELÇUK (2022).

Uma vez finalizada a construção, a peça modelada é removida da base, e o excesso de pó pode ser retirado e, em alguns casos, até reutilizado. Contudo, é importante observar que a reciclabilidade pode ser limitada, especialmente em sistemas que envolvem cimento Portland.

Dentre as características notáveis desse processo, destaca-se sua capacidade em produzir estruturas complexas com geometrias elaboradas e múltiplas direções, graças ao leito de partículas temporariamente atuante como suporte, eliminando a necessidade de escoras ou apoios adicionais. Adicionalmente, essa técnica permite a impressão de peças inclinadas, realçando uma de suas maiores vantagens: a alta resolução (TAY *et al.*, 2018).

Contudo, essa alta resolução pode, por outro lado, impor limitações na aplicação do método em construções *in situ*, em que a impressão é realizada diretamente no local de uso final, assim como na produção de peças contínuas de grandes dimensões. Logo, o Jato de Aglutinante se sobressai como um processo de

impressão 3D com particularidades que geram tanto oportunidades quanto desafios, variando conforme o contexto de aplicação.

Nesse sentido, dentre as experiências no âmbito da construção, o projeto que se sobressai é o D-Shape, projetada para a construção de estruturas arquitetônicas e elementos construtivos de grande escala. Esta tecnologia de origem italiana buscou redefinir os limites tradicionais da construção por meio da impressão em 3D.

### **3.2.1. D-Shape**

Desenvolvida e patenteada pelo italiano Enrico Dini em 2007, a tecnologia D-Shape é um sistema de impressão 3D que opera por meio de camadas alternadas de material granular, transformando-o em formas pela aplicação de um ligante apropriado. A base dessa inovação reside em uma combinação inteligente de materiais cimentícios, ligantes químicos e areia, tudo sob a coordenação de um processo altamente preciso e automatizado.

O procedimento tem início com a concepção digital da estrutura desejada, que é então subdividida em camadas finas por um software especializado, que serão construídas uma a uma durante o processo de impressão. A impressora D-Shape é preparada para o processo de impressão e assume a tarefa de depositar meticulosamente camada por camada de um material granuloso sobre uma plataforma de construção. O processo avança à medida que essa camada de pó seco é compactada e solidificada por meio da aplicação controlada do material ligante, distribuído por múltiplos bicos dispostos ao longo do equipamento. Esse ciclo se repete até que a peça final seja completamente formada, resultando em uma estrutura sólida e complexa (LIM et al., 2012).

Figura 14- Processo de Impressão 3D tecnologia -Shape.



Fonte: JASSMI; NAJJAR; MOURAD (2017).

Finalmente, o excesso de material não aglutinado é cuidadosamente removido, muitas vezes com a ajuda de um sistema de filtros localizado na parte inferior da área de trabalho (LIM *et al.*, 2012). É importante lembrar que o acúmulo de pó durante o processo de impressão D-Shape pode ser inevitável devido à natureza dos materiais granulares. Portanto, a limpeza subsequente faz parte do processo e deve ser considerada no planejamento. A eficácia da limpeza e a gestão do excesso de pó podem variar dependendo das condições específicas do local de impressão, dos materiais utilizados e da tecnologia de impressão. Além disso, é importante notar que a remoção do modelo impresso deve ocorrer somente após 24 horas, tempo necessário para que o concreto atinja a resistência adequada e cure adequadamente.

A máquina D-Shape se assemelha a uma estrutura de portal que sustenta uma estrutura periférica elevada por quatro colunas. Nessa estrutura, existem dois componentes: um distribui e espalha um material granular, enquanto o segundo segura a cabeça de impressão equipada com diversos pequenos bicos que aplicam um aglutinante aquoso. Todo o processo é monitorado por um computador, porém, a

presença de pelo menos um operador e alguns assistentes são obrigatórios para garantir a qualidade e eficiência do processo de fabricação (DINI, 2009).

Figura 15- Plano de impressão de uma impressora D-Shape.



Fonte: NUNZIA (2022).

Uma das características notáveis da tecnologia D-Shape é a sua habilidade em oferecer altas resoluções e liberdade geométrica. As camadas finas, com espessura de 4 a 6 mm, em conjunto com os vários bicos de impressão, permitem criar geometrias complexas e personalizadas que seriam inviáveis com os métodos tradicionais (LIM *et al.*, 2012).

O D-Shape é projetado para ser versátil em relação a materiais e aglutinantes: o material granular pode ter quase qualquer composição, enquanto o aglutinante pode consistir em diferentes soluções aquosas com aditivos variados. Como resultado, ele se torna a única e pioneira impressora 3D em larga escala capaz de construir integralmente estruturas de edifícios em uma única etapa, desde o subsolo até o telhado, abrangendo tetos, escadas, relevos e paredes de divisórias (DINI, 2009).

A tecnologia D-Shape oferece uma série de vantagens significativas para a gestão e os custos de construção. A automação do processo reduz a necessidade de mão de obra, diminuindo a dependência de uma grande equipe de construção. Além disso, a minimização do desperdício de material é notável, já que o excesso de pó

pode ser recolhido e reutilizado. A rapidez do método também resulta em economia de tempo em comparação com os métodos manuais.

Figura 16- Uma impressora D-Shape e um sistema em funcionamento.



Fonte: LOWKE *et al.* (2018).

Apesar de todas essas vantagens, é importante considerar que a máquina D-Shape possui limitações no tamanho final da estrutura devido às dimensões do equipamento. Entretanto, a redução de resíduos e a eficiência no uso de materiais cimentícios contribuem para um impacto ambiental mais sustentável em comparação com os métodos tradicionais de construção. Em resumo, a tecnologia D-Shape não apenas revoluciona o processo de construção, mas também redefine os padrões de eficiência, personalização e sustentabilidade na indústria da construção.

### **3.3. Comparativo das principais tecnologias**

Dentro dessa perspectiva, será apresentada a seguir uma tabela comparativa destacando algumas características, propriedades, vantagens e limitações das três tecnologias abordadas, as quais são amplamente reconhecidas e estabelecidas no mercado de MA de concreto: D-Shape, Contour Crafting e Impressão 3D de Cimento (3DCP). Essa abordagem proporcionará uma análise mais sucinta das diferentes abordagens e das suas contribuições para a inovação na indústria da construção civil.

Tabela 4- Comparação entre Contour Crafting, 3D Concrete Printing Process e D-shape.

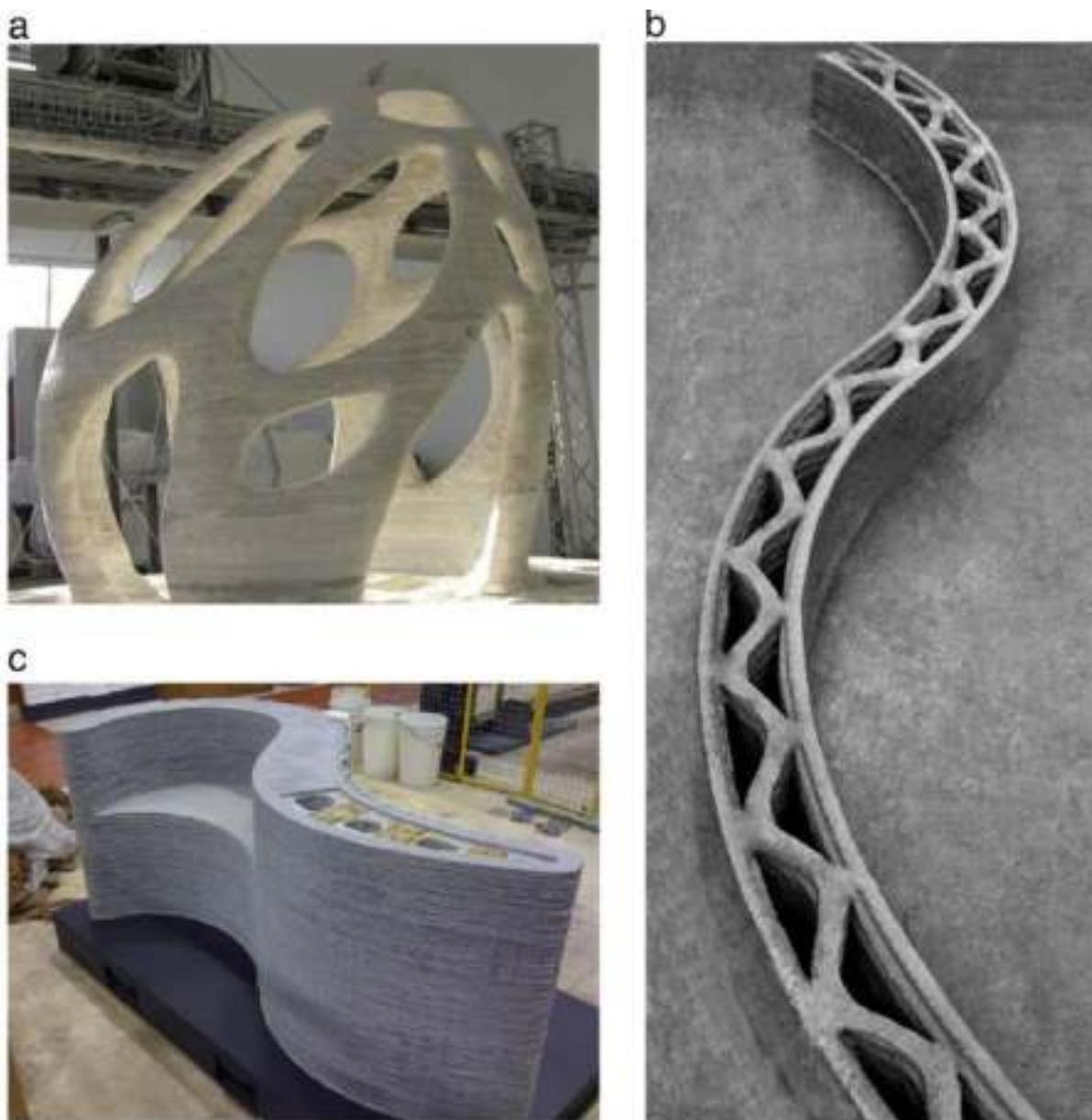
	<b>CONTOUR CRAFTING</b>	<b>3D CONCRETE PRINTING PROCESS</b>	<b>D-SHAPE</b>
<b>PROCESSO</b>	Extrusão de material ou deposição de material fundido	Extrusão de material ou deposição de material fundido	Jato de Aglutinante ou “binder jetting”
<b>MATERIAL DE CONSTRUÇÃO</b>	Mistura de argamassa cimentícia para molde e construção	Concreto para impressão (formula própria)	Material granular (pó de areia + rocha)
<b>MATERIAL AGLUTINANTE</b>	Nenhum (extrusão de material úmido e preenchimento)	Nenhum (extrusão de material úmido)	Soluções aquosas
<b>DIÂMETRO DO BICO</b>	15 mm	9–20 mm	0.15 mm
<b>NÚMERO DE BICOS</b>	1	1	6-300
<b>ESPESSURA DA CAMADA</b>	13 mm	6–25 mm	4—6 mm
<b>REFORÇO</b>	Pode Ser Requerido	Sim	Não
<b>PRÓS</b>	Bom acabamento, devido a ação das espátulas laterais.	Alta resistência; Liberdade da Forma;	Alta resistência; Liberdade da Forma;
<b>CONTRA</b>	Processo de moldagem (extra)	Taxa de deposição (bico único)	Tamanho de impressão limitado (estrutura de impressão), remoção e limpeza do material não utilizado

Fonte: Adaptado de LIM *et al.* (2012).

A análise da tabela acima revela semelhanças nas abordagens dos três principais métodos de manufatura aditiva para impressão de concreto. Inicialmente, tanto o 3D Concrete Printing (3DCP) quanto o Contour Crafting (CC) fundamentam-

se no princípio da extrusão de material ou deposição de material fundido, enquanto o método D-Shape baseia-se no jato de aglutinante, também conhecido como "binder jetting".

Figura 17- Exemplos de construções em escala real de cada processo, (a) D-Shape, no canto superior esquerdo, (b) Contour Crafting, à direita, e (c) Concrete Printing, no canto inferior esquerdo.



Fonte: LIM. *et al.* (2012).

De acordo com Gardner (2013), a opção pela impressão por extrusão oferece vantagens em relação a outros métodos, uma vez que optar por uma máquina baseada na extrusão permite que a maior parte do design seja independente do material a ser extrudado. Isso proporciona flexibilidade, possibilitando, assim, que

algumas decisões de design sejam adiadas ou separadas umas das outras. Por outro lado, nos sistemas de jato de aglutinante, como o D-Shape, é necessário definir as propriedades precisas do material de impressão desde o início do processo. Isso se deve ao fato de que a aplicação e confinamento do material são elementos essenciais do funcionamento mecânico da impressora.

Além disso, em outro aspecto relevante, o método de 3DCP requer a introdução de reforço estrutural para sustentar projeções ou outras estruturas de formas livres, como pode ser exemplificado pelo caso de um banco impresso pelo grupo de pesquisadores da Universidade de Loughborough. Trata-se de uma estrutura que se assemelha a uma parede em termos de complexidade e foi criada com o propósito de demonstrar a viabilidade da aplicação em larga escala desse processo. Com dimensões de 2 metros de comprimento, 0,9 metros de largura e 0,8 metros de altura, esta estrutura é composta por 128 camadas impressas, em média, em 20 minutos cada. A estratégia-chave aqui é o reforço para suportar componentes impressos em 3D de grande porte, assim, um total de 23 vazios (identificados como buracos cinza na figura abaixo) foram projetados para a posterior inserção de barras de reforço com 8 mm de diâmetro. Em seguida, essas barras foram tensionadas e preenchidas com argamassa para alcançar uma resistência à compressão predefinida. Essa abordagem oferece um método simples e viável para reforçar componentes de cimento de grande porte, demonstrando, assim, o potencial da fabricação automatizada em construções em grande escala (LIM *et al.*, 2012).

Figura 18- Banco construído com 3DCP, composto de 128 camadas, com reforço estrutural.



Fonte: Adaptado de LIM. *et al.* (2012).

Em contrapartida, tanto o Contour Crafting quanto o método D-Shape utilizam apenas um único material, porém adotam estratégias distintas para a produção de diferentes elementos. No caso do método CC, a ênfase principal está na criação vertical das estruturas por meio de compressão. Esse processo é projetado de forma a permitir que a própria estrutura se mantenha estável, sem a necessidade de materiais adicionais para sustentar projeções. Em situações específicas, como acima das aberturas de portas ou janelas, são inseridas vergas horizontais necessárias para evitar o problema do vão. Estas são colocadas de maneira automatizada por meio dos braços robóticos industriais presentes na impressora. Por outro lado, o método italiano D-Shape adota uma abordagem diferente, empregando o próprio material não

consolidado como suporte (LIM *et al.*, 2012). Essa técnica elimina a necessidade de introduzir um segundo material ou adotar estratégias adicionais para a sustentação, tornando o processo mais eficiente em termos de utilização de recursos e materiais.

Um aspecto comum aos três métodos é a construção em camadas, com cada etapa subsequente se sobrepondo à anterior. Essa abordagem laminar não apenas aumenta a precisão na criação do produto final, mas também abre portas para uma variedade de aplicações e inovações.

No entanto, como observado por Buswell *et al.* (2018), é essencial desenvolver estratégias que garantam a robustez e ductilidade dos componentes, especialmente quando destinados a aplicações estruturais. É importante considerar que a estrutura em camadas provavelmente será anisotrópica, o que significa que podem ocorrer vazios entre os filamentos, comprometendo a capacidade estrutural do objeto final. Além disso, a conexão entre esses filamentos e camadas desempenha um papel significativo na determinação das propriedades finais do concreto endurecido. Portanto, atingir alta resistência à compressão e flexão, juntamente com uma sólida aderência à tração, é o principal objetivo no desenvolvimento de concreto para essa finalidade.

A fim de abordar essa questão, diversos estudos têm explorado as propriedades mecânicas e o reforço na impressão 3D do concreto. Em uma pesquisa conduzida por Panda, Paul e Tan (2017), eles investigaram a inclusão de fibras e chegaram à conclusão de que essa adição tem um impacto limitado na resistência à compressão, mas oferece notáveis melhorias em termos de resistência à flexão e tração. Além disso, destacaram que essas propriedades mecânicas não dependem apenas do comprimento das fibras, mas também da forma como estão dispostas. Já no estudo de Paul *et al.* (2018), não foi encontrada uma correlação entre o limite de elasticidade, viscosidade e tixotropia, que é um fenômeno em que um material se torna menos viscoso quando agitado ou submetido a forças de cisalhamento, em relação aos materiais 3D imprimíveis. A pesquisa também ressaltou que a direção de impressão influencia significativamente as propriedades mecânicas, assim como a forma do orifício do bico e a complexidade dos objetos a serem impressos.

A escolha entre esses métodos de prototipagem rápida de concreto não apenas depende das características específicas do projeto, mas também das vantagens e

desafios oferecidos por cada um. Cada método traz consigo a capacidade de criar estruturas personalizadas e inovadoras, e a seleção da abordagem mais adequada pode ser um diferencial crucial no desenvolvimento de projetos de construção modernos e eficientes. Além disso, é importante ressaltar que a evolução contínua dessas tecnologias de impressão 3D de concreto, juntamente com a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, está expandindo as possibilidades e aplicações desses métodos na construção civil. Portanto, a escolha informada e a adaptação às necessidades específicas de cada projeto são fundamentais para aproveitar ao máximo o potencial dessas inovações na indústria da construção civil.

### **3.4. Métodos alternativos**

Nesta última década, as tecnologias de impressão 3D, como a tecnologia Contour Crafting (CC), Concrete Printing e D-Shape, desempenharam um papel importante na transformação da indústria da construção. Com o uso desses métodos, a construção de edifícios e de estruturas busca ser mais inovadora e eficiente. No entanto, conforme já citado, é crucial lembrar que o campo da impressão 3D está em constante evolução, com novos métodos surgindo continuamente para redefinir os padrões existentes.

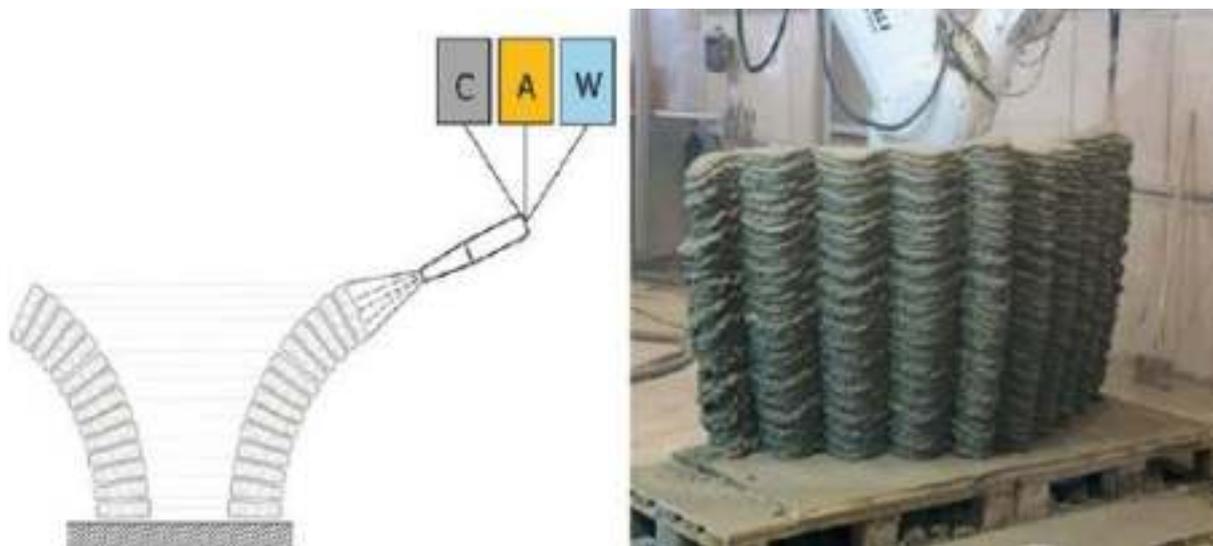
Dentro desse contexto, torna-se relevante explorar técnicas menos abordadas pela literatura, bem como as metodologias emergentes que estão moldando o futuro da impressão 3D na construção. Além das já mencionadas, também foram desenvolvidas técnicas para criar estruturas complexas e funcionais, alinhando-se às demandas da indústria. Essas inovações se alinham às categorias propostas pela Sociedade Alemã de Tecnologia do Concreto e da Construção (DBV) como Jateamento de Material e moldagem contínua, também conhecida como "slipform". No caso do Jateamento de Material, ou "Spraying", o material é depositado por pulverização, seja em um túnel ou em uma superfície vertical. Já a moldagem contínua, por sua vez, cria estruturas de concreto vertical de maneira contínua à medida que avança, apresentando abordagens inovadoras para criar estruturas contínuas e otimizadas.

A exploração dessas novas metodologias de prototipagem rápida na construção proporciona uma visão abrangente e dinâmica de métodos e aplicações inovadores. Dentro dessa perspectiva, a seguir, serão apresentados esses processos de impressão emergentes, com o objetivo de identificar suas tecnologias e características distintas que estão contribuindo de maneira significativa para a indústria da construção.

### 3.4.1. Jateamento de Material

O jateamento de material, também conhecido como "spraying", é um método no qual o concreto é pulverizado sobre uma superfície camada sobre camada. Essa abordagem é frequentemente empregada para aplicar revestimentos de concreto em superfícies já existentes ou para criar novas estruturas, elementos decorativos e texturizados. A pulverização controlada permite uma distribuição uniforme do material, mesmo em áreas de difícil acesso.

Figura 19- Esquema do processo de tecnologia de jateamento de material ("spraying"). C, W e A correspondem a cimento, água e agregado, respectivamente.



Fonte: GÜLLE; SELÇUK (2022).

Uma técnica que se baseia nesse processo é o Shotcrete 3D Printing (SC3DP), desenvolvida por pesquisadores da Universidade Técnica de Braunschweig, na Alemanha. Ao contrário da tradicional extrusão multicamada, o SC3DP não extrude o

concreto, em vez disso, a camada é aplicada por pulverização, utilizando ar comprimido controlado no molde de extrusão, camada por camada. O concreto pode ser projetado diretamente ou sobre um suporte móvel temporário (GÜLLE; SELÇUK, 2022).

Figura 20- Shotcrete 3D Printing (SC3DP), desenvolvida por pesquisadores da Universidade Técnica de Braunschweig, na Alemanha.



Fonte: KURMANN (2019).

Essa abordagem de fabricação aplica o material apenas onde é necessário, seja por razões estruturais, funcionais ou de design, resultando em uma adesão sólida entre as camadas. A impressora foi desenvolvida pelo Laboratório de Produção de Edifícios Digitais da Universidade Técnica de Braunschweig e é composta por uma máquina de portal de 5 eixos, controlada por um sistema conhecido como Controle Numérico Computadorizado (CNC), que permite um controle preciso da máquina, juntamente com um robô de 6 eixos de grande porte.

Equipado com um bico alimentado por uma bomba de parafuso excêntrico, o braço robótico oferece ampla liberdade de movimento, permitindo ajustar o ângulo de

aplicação durante a produção. Isso proporciona maior liberdade geométrica nas formas produzidas, tornando a tecnologia SC3DP adequada para alcançar alto grau de liberdade de design e a integração de diversos materiais. Além disso, possibilita acabamentos controlados por CNC, incluindo alisamento, fresagem e outros processos interativos.

Figura 21- Impressão 3D de Componentes de Concreto de Grande Formato com aplicação de acabamentos.



Fonte: DBZ (2019).

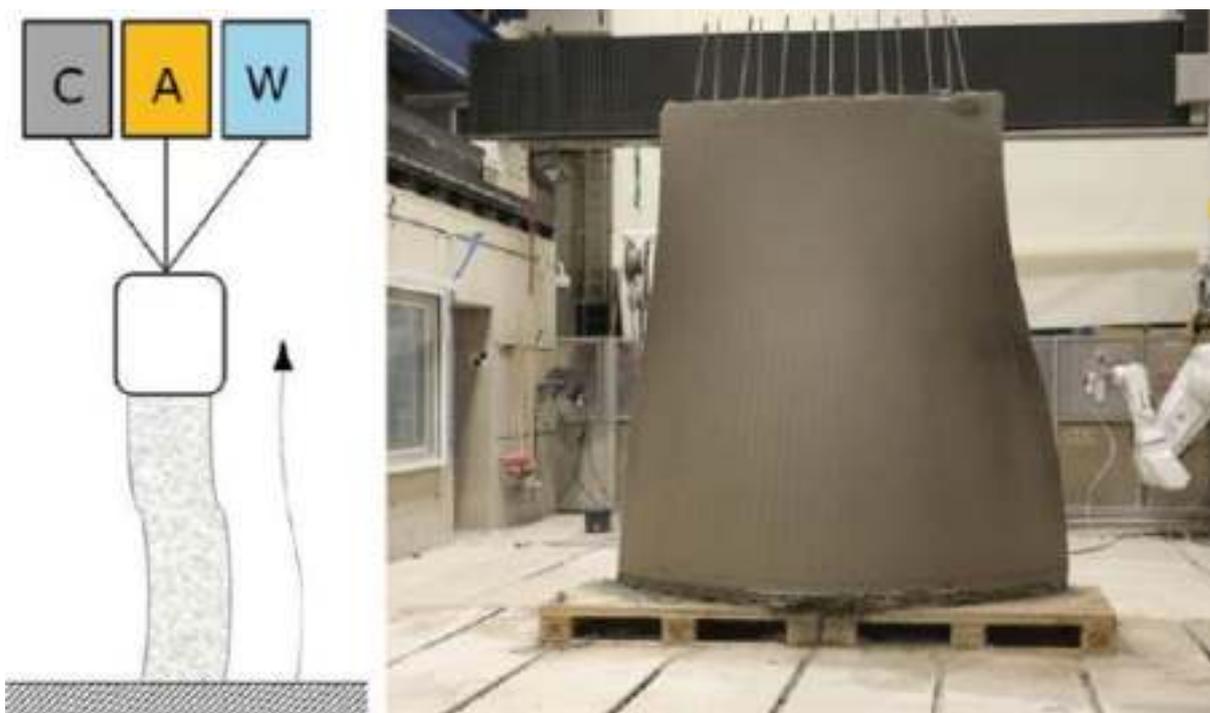
Uma das principais vantagens dessa abordagem é a utilização de tecnologias consolidadas para o transporte e a solidificação do concreto projetado, o que pode aumentar as taxas de produção. Adicionalmente, essa técnica facilita a transição de estruturas horizontais para verticais, aproveitando a solidez das misturas projetadas.

### **3.4.2. Moldagem contínua (Slipform)**

O método de moldagem contínua, também conhecido como "slipform", é amplamente empregado na construção de elementos verticais de grande porte, como

torres de água e pilares de pontes. Nesse processo, um molde é continuamente elevado à medida que o concreto é adicionado à base da estrutura. Essa abordagem possibilita a construção contínua e progressiva da estrutura conforme o molde se move para cima, solidificando o concreto úmido e maleável ao emergir.

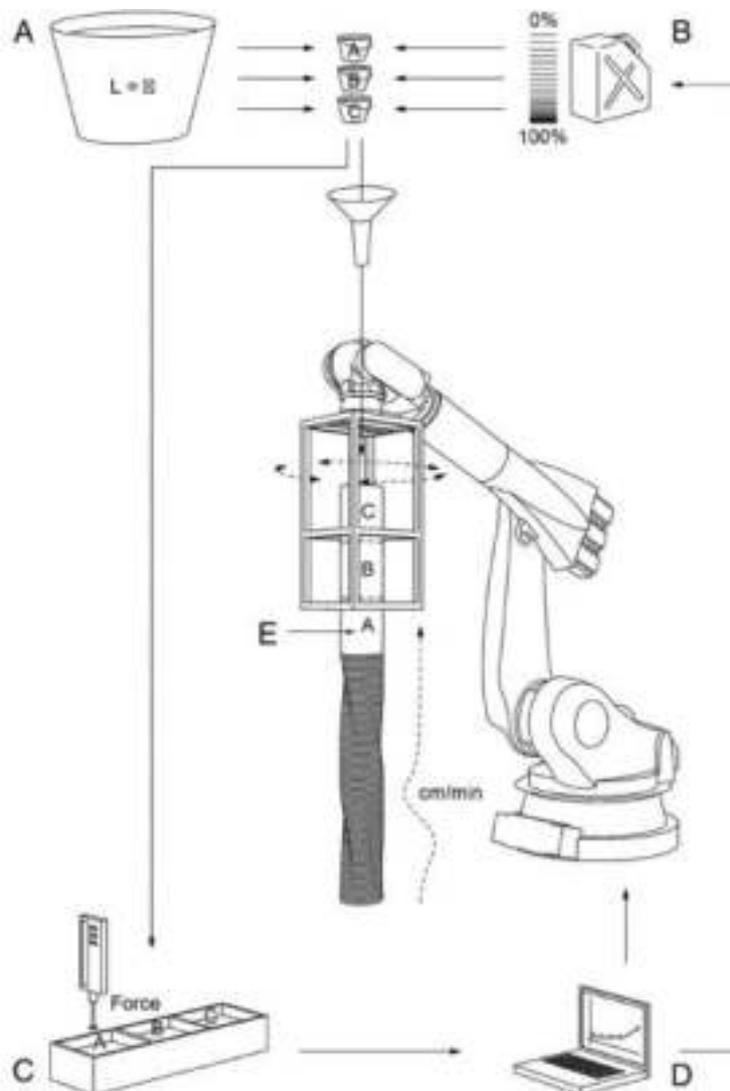
Figura 22- Esquema do processo de moldagem contínua ("slipform"), o material pré-misturado é inserido na cabeça de impressão em movimento vertical, com a velocidade ajustada à cinética de endurecimento do concreto. C, W e A correspondem a cimento, água e agregado, respectivamente.



Fonte: GÜLLE; SELÇUK (2022).

Uma tecnologia baseada nesse processo é conhecida como Smart Dynamic Casting (SDC), desenvolvida pelo Instituto Federal de Tecnologia de Zurique, na Suíça, no início dos anos 2010. Essa fabricação possibilita a criação de estruturas verticais de concreto e geometrias, eliminando a necessidade de moldes personalizados. O foco central do SDC é a robotização da moldagem contínua, visto que o concreto é continuamente inserido em um molde que se move verticalmente, ajustando sua velocidade conforme o concreto endurece. Isso permite que o concreto se sustente após ser liberado do molde, evitando, assim, a necessidade de forçar sua saída, ao contrário do processo de extrusão.

Figura 23- Princípio do processo Smart Dynamic Casting: A) Concreto é preparado com um retardador de endurecimento; B) adição do acelerador de aderência; C e D) correspondem a um controle em linha da progressão da reologia, permitindo controlar a taxa de elevação das peças moldadas; E) endurecimento do formato pela colocação nas peças moldadas;

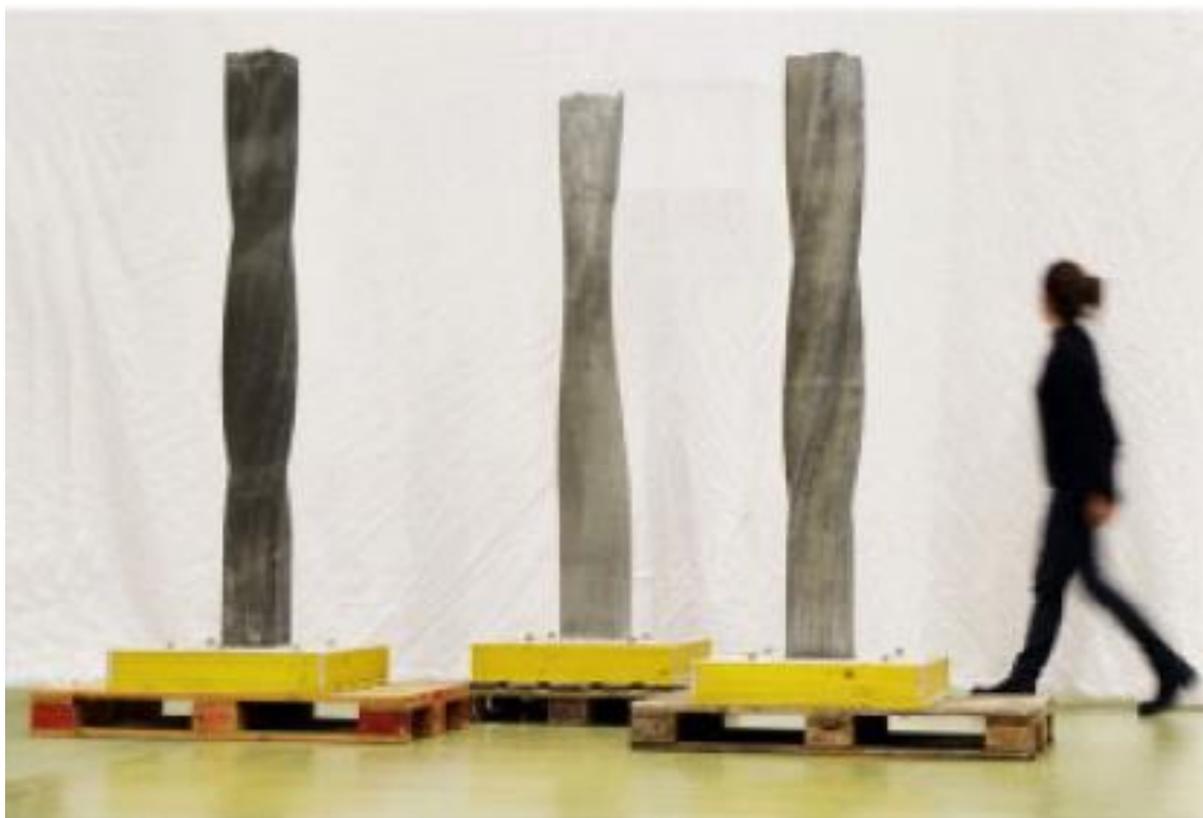


Fonte: LLORET *et al.* (2015).

Essa técnica pode utilizar um bico de saída flexível ou rígido, acoplado a um braço robótico de seis eixos, que molda o concreto no momento da saída. Esse braço, por sua vez, proporciona uma moldagem dinâmica do concreto, enquanto um controle em tempo real da viscosidade do material determina a velocidade de elevação das formas, pois um levantamento muito rápido resultaria em um concreto excessivamente fluido, incapaz de suportar seu próprio peso, enquanto um levantamento lento demais geraria tensão de atrito entre as formas e o concreto, podendo causar rupturas na estrutura impressa (SHAHAB *et al.*, 2013).

O Smart Dynamic Casting se destaca especialmente na criação de elementos de coluna com seções transversais variáveis, utilizando moldes deformáveis controlados digitalmente. Além disso, essa técnica também tem sido aplicada com sucesso na construção de estruturas curvadas, concavas e convexas, as quais oferecem maior resistência à flexão.

Figura 24- Exemplos de elementos produzidos com a técnica Smart Dynamic Casting.



Fonte: LLORET *et al.* (2015).

Como parte de sua evolução contínua, o SDC está sendo refinado para possibilitar a produção de paredes angulares, esbeltas e curvas, conforme demonstrado por GRAMAZIO *et al.* (2019). Entre as vantagens mais proeminentes do SDC em comparação com outras técnicas, incluem-se a capacidade de contornar reforços de aço convencionais, a reduzida ocorrência de problemas na interface entre camadas e a obtenção de alta qualidade na superfície final.

#### 4. O CONCRETO IMPRESSO

Um dos grandes desafios da manufatura aditiva na construção civil de matriz aditiva é a escalabilidade, ou seja, a capacidade de produzir componentes em grande escala para atender às demandas de projetos de maior porte. Apesar dessa barreira, já se consegue imprimir estruturas de grande magnitude, incluindo paredes, colunas e até prédios completos, evidenciando o potencial revolucionário dessa tecnologia. Exemplos concretos de empreendimentos bem-sucedidos, que serão apresentados mais detalhadamente no capítulo 5 deste trabalho, ilustram a viabilidade e a eficácia da manufatura aditiva na construção civil.

É importante ressaltar que a MA na construção civil ainda é uma tecnologia emergente, mas, aos poucos, está sendo aplicada em projetos de grande escala. Um exemplo notável é o primeiro edifício construído do mundo utilizando uma impressora 3D, que foi projetado pela empresa chinesa WinSun. Esse marco evidencia o progresso e a viabilidade da tecnologia na construção, demonstrando que a metodologia pode ser aplicada em projetos reais e concretos, mesmo em setores tradicionais como a construção civil.

Figura 25- Fachadas do edifício com cinco andares, na China.



Fonte: TECHTUDO (2015).

Figura 26- Ligas e reforços em aço prometem uma estrutura segura no edifício impresso em 3D; Parede impressa com tecnologia, camadas; à direita, foto interna do edifício: janelas foram embutidas nos apartamentos do edifício projetado pela empresa chinesa WinSun, respectivamente.



Fonte: TECHTUDO (2015).

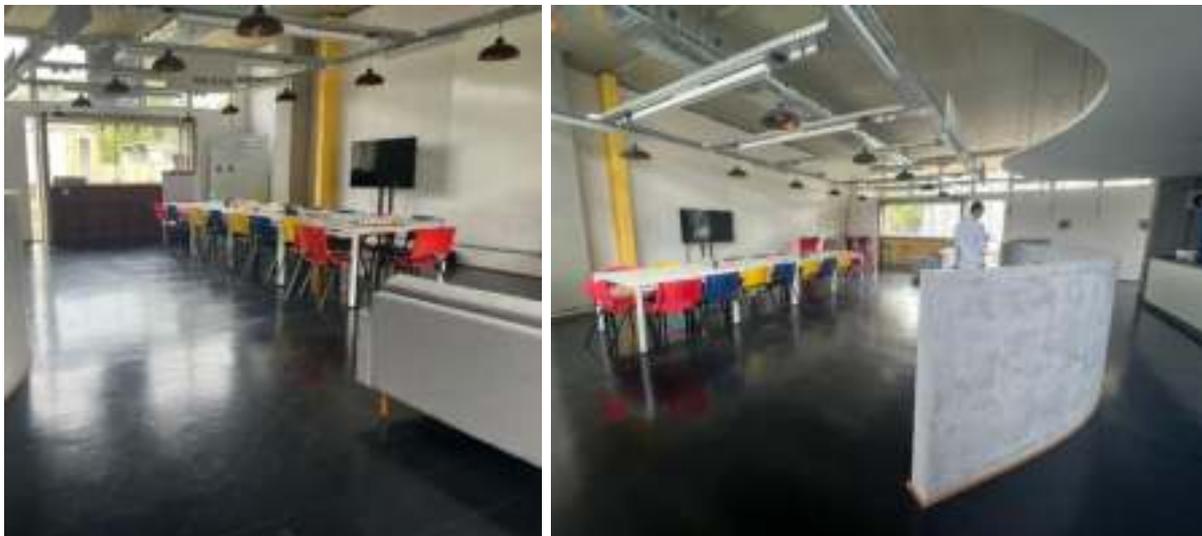
Além desses exemplos práticos, também merece destaque a criação de laboratórios e centros de pesquisa focados na exploração e aprimoramento do conhecimento em prototipagem rápida e inovação. Nesse contexto, a autora deste trabalho teve a oportunidade de vivenciar uma experiência significativa no Hubic, um espaço colaborativo dedicado a soluções hardtech e pré-competitivas. Esse ambiente é o resultado de uma parceria entre a Universidade de São Paulo (USP), especialmente sua renomada Escola Politécnica, a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e o Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC). Essa colaboração visa desenvolver inovações que não apenas impulsionem a competitividade nos países em desenvolvimento, mas também estejam alinhadas com princípios cruciais, como a redução da pegada ambiental, a diminuição das emissões de carbono, a alta produtividade, a qualidade e o desempenho.

Impulsionado por uma visão abrangente, o Hubic busca disseminar soluções e ações que preparem o setor da construção e a sociedade como um todo para uma transição mais suave em direção a uma economia digital e circular. O espaço está em constante movimento, promovendo eventos como as *Tech talks*, compartilhando casos reais de sucesso, oferecendo cursos e até facilitando programas de troca de conhecimento e experiência.

Dentro desse ambiente, encontram-se espaços de coworking e laboratórios especializados. Entre eles, destaca-se o Laboratório de Impressão 3D em Concreto, conhecido como DCLab, equipado com máquinas de extrusão de concreto,

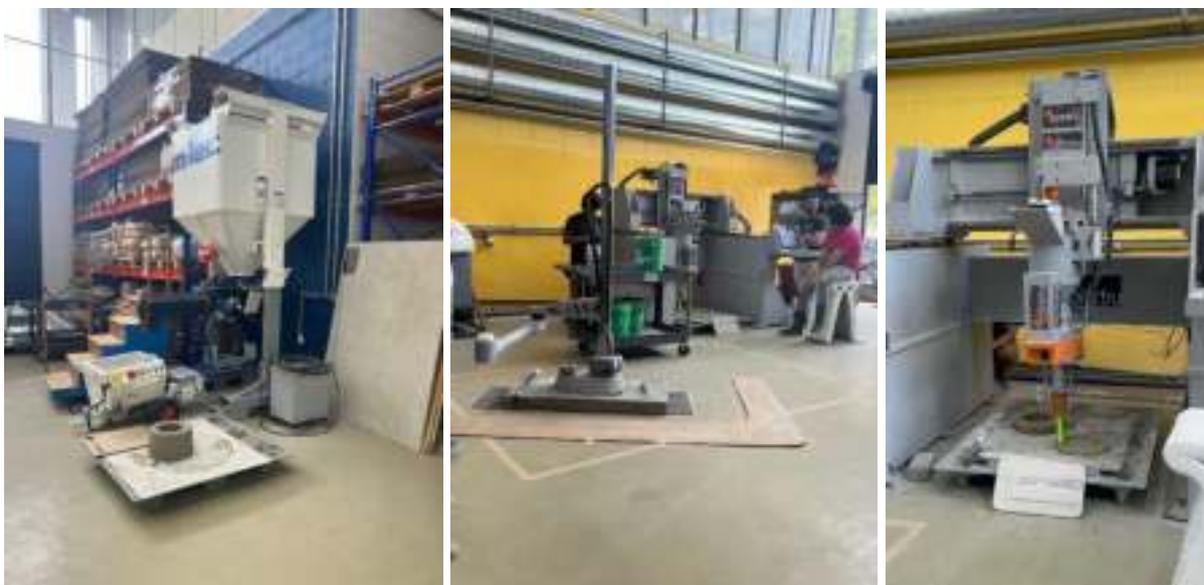
desempenhando um papel fundamental para o progresso da tecnologia de impressão 3D.

Figura 27- Espaço de Coworking do Hubic.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

Figura 28- Maquinário do laboratório de Impressão 3D em Concreto.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

Ao ingressar no laboratório, os visitantes são recebidos por uma série de protótipos de testes de impressão. Esses testes meticulosos foram essenciais para ajustar as composições do traço de concreto de forma precisa. É importante ressaltar que, mesmo que a produção em escala total ainda não tenha sido alcançada, já foram

atingidos significativos marcos. A maior estrutura impressa até o momento tem 1 metro de altura, conforme a figura abaixo.

Figura 29- Exemplos de objetos impressos em 3D no laboratório. À esquerda, o elemento mais alto impresso até o momento.

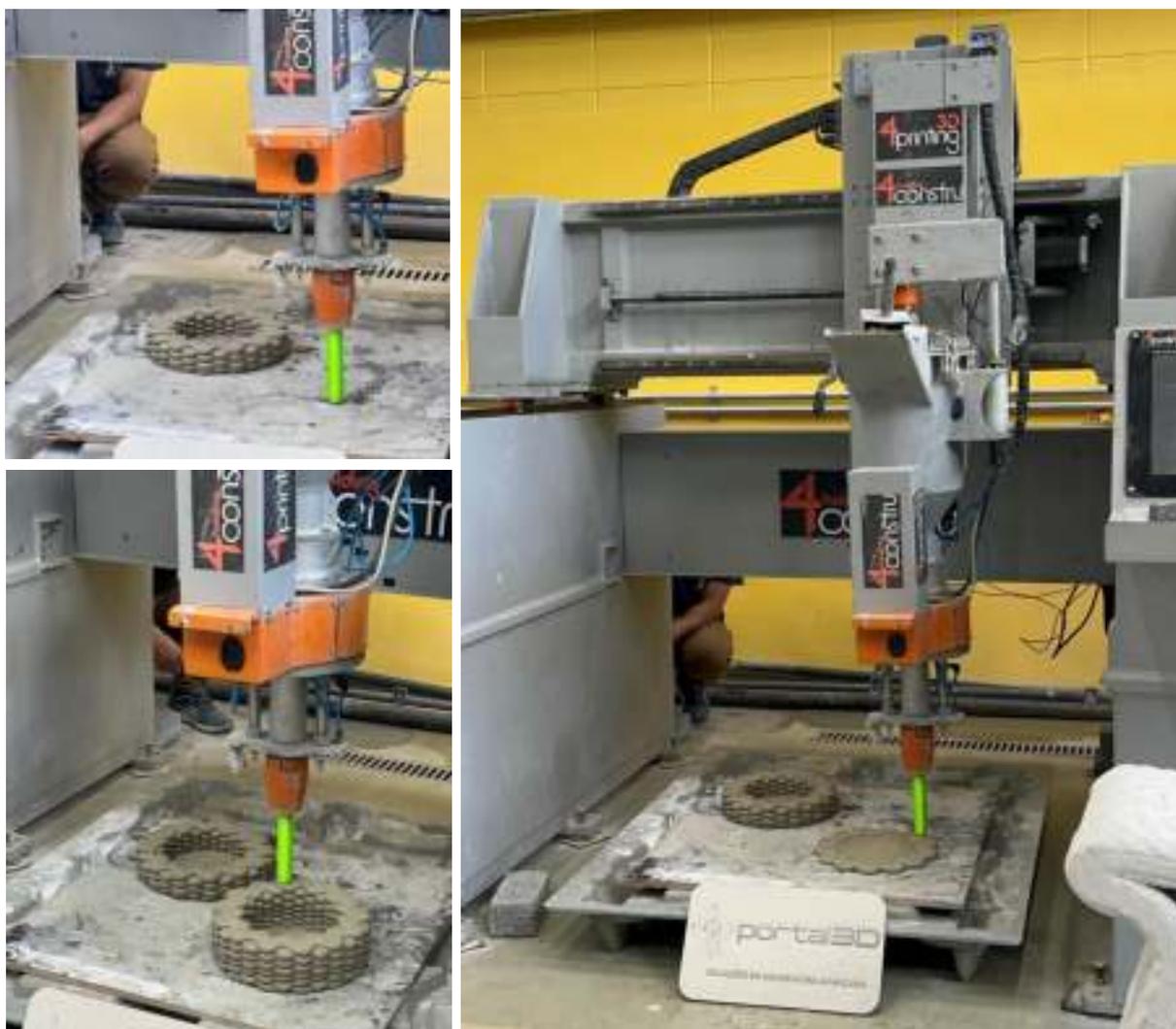


Fonte: Acervo pessoal (2023).

Um projeto futurista, aguardado com expectativa até o final deste ano, é a impressão 3D de um módulo completo de cozinha. Esse desafio ambicioso tem como objetivo validar a aplicação da impressão 3D na construção civil por meio da criação de uma cozinha de 2,5 metros por 3 metros, na qual todos os mobiliários e as paredes serão impressos em 3D. Ao demonstrar essa aplicação prática, o laboratório testa os limites da tecnologia, além de fomentar a aceitação e a adoção da impressão 3D na indústria da construção.

É interessante observar que o DCLab não se restringe à impressão de concreto, apesar do nome. O laboratório também opera outros tipos de impressoras, ampliando o escopo de inovação e pesquisa. Uma das realizações notáveis desse espaço é a formulação da composição do concreto que emite apenas 250 kg/m<sup>3</sup> de carbono, uma redução expressiva em comparação à emissão típica de cerca de 600kg/m<sup>3</sup>.

Figura 30- Impressora 3D em funcionamento.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

A visita ao HubIC e ao DCLab proporcionou uma imersão completa no universo da impressão 3D em concreto. A oportunidade de observar a impressora em ação e examinar os objetos já produzidos pelo laboratório ofereceu uma compreensão mais profunda da aplicação prática dessa tecnologia. Além disso, o contato direto com os profissionais envolvidos permitiu uma troca rica de informações e a ampliação do conhecimento em uma área que está em constante evolução. Sendo assim, essa experiência solidificou o compromisso com a inovação e a busca incessante por soluções revolucionárias na construção civil.

Figura 31- Visita ao HubIC e ao DCLab.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

Nesse contexto de constante evolução e avanços, é possível notar que a Manufatura Aditiva tem sido explorada no setor da construção civil, trazendo à tona novas perspectivas no que diz respeito a abordagens de design e construção. Além disso, estão sendo introduzidas uma variedade de inovações que têm como propósito transformar e otimizar a indústria, quando comparadas aos métodos tradicionais de construção. Para ilustrar essa transformação, foi elaborado um compilado na tabela abaixo, adaptado de Warsawski (1999), que compara atividades nas indústrias de manufatura aditiva com atividades da construção tradicional.

Tabela 5- Comparativo entre as atividades nas indústrias de manufatura aditiva e das atividades de construção tradicional.

	<b>INDÚSTRIAS DE MANUFATURA</b>	<b>INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO</b>
<b>1</b>	Todas operações realizadas em um local específico na fábrica	Trabalho disperso entre locais temporários no ambiente de construção
<b>2</b>	Alto grau de repetição e padronização	Cada projeto tem diferentes recursos
<b>3</b>	Uma pequena quantidade de tarefa simples é necessária para execução do produto	Grande quantidade de tarefas exigindo habilidades manuais para concluir o produto
<b>4</b>	Todas atividades desenvolvidas em estações de trabalho fixas	As atividades ocorrem em uma ampla área de trabalho, exigindo constante deslocamento dos trabalhadores.
<b>5</b>	Espaço de trabalho cuidadosamente ajustado as necessidades humanas	Ambientes de trabalho desagradável
<b>6</b>	Equipe de trabalho estável	Alta rotatividade de trabalhadores

Fonte: Adaptado de WARSAWSKI (1999).

Após esta análise comparativa entre as atividades nas indústrias de manufatura aditiva e da construção tradicional, percebe-se um conjunto significativo de vantagens oferecidas pela tecnologia de modelagem aditiva no contexto da construção civil. A automação da construção, conforme observado por Warszawski (1999), busca resolver os graves problemas persistentes da indústria atualmente, como eficiência baixa, acidentes frequentes, desorganização no canteiro de obras e falta de qualidade. A manufatura aditiva, por meio de sua abordagem automatizada, reduz, de maneira significativa, a dependência de mão de obra humana, o que contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente.

Uma das vantagens significativas da impressão 3D de concreto é a notável redução de custos e do tempo de construção. A automatização desse processo possibilita uma diminuição considerável no período necessário para a conclusão de uma obra. No entanto, é importante notar que os custos iniciais da impressão 3D de concreto são geralmente elevados devido à natureza emergente desta tecnologia (KHOSHNEVIS, 2004; YOSSEF; CHEN, 2015; FLORÊNCIO et al., 2016).

Esses custos iniciais elevados podem ser atribuídos a diversos fatores, como a aquisição de equipamentos de impressão 3D de grande escala e de alta qualidade, que são projetados para atender a especificações rigorosas e, portanto, são caros. Além disso, a impressão 3D de concreto requer materiais específicos, como concretos especiais. O treinamento e a qualificação de operadores para operar essas máquinas também representam um investimento significativo (KHOSHNEVIS, 2004).

No entanto, é necessário destacar que, apesar dos custos iniciais mais elevados, a impressão 3D de concreto frequentemente compensa a longo prazo devido às economias de custos potenciais em termos de mão de obra, desperdício de materiais e prazos de construção reduzidos. Existem várias abordagens diferentes para a impressão 3D, mas não existe uma solução única para os desafios arquitetônicos. As impressoras de grande escala podem produzir com alta resolução e consistência no tempo, independentemente da complexidade do objeto. Portanto, a combinação dessa tecnologia aditiva com processos de fabricação tradicionais pode resultar em soluções econômicas (DILLENBURGER, 2022).

A tecnologia de impressão 3D permite a criação mais rápida de estruturas, eliminando etapas intermediárias e reduzindo a dependência das condições climáticas. Além disso, a flexibilidade de design possibilitada pela impressão 3D acelera o processo de construção, uma vez que os componentes podem ser produzidos de acordo com as especificações exatas do projeto. Isso foi comprovado pelo estudo apresentado por Buswell *et al.* (2007), que demonstrou uma redução de 35% no tempo necessário para construir uma parede estrutural com a utilização da impressão 3D em comparação com a construção tradicional em alvenaria.

Além disso, a tecnologia de impressão 3D traz consigo uma notável redução no desperdício de materiais, podendo reduzir em mais de 80% o uso de materiais (DILLENBURGER, 2022). Esta eficiência na utilização de recursos representa um benefício adicional em termos de sustentabilidade e economia. A natureza aditiva do processo possibilita a aplicação precisa do material somente onde é necessário, minimizando o uso excessivo e a produção de resíduos (KHOSHNEVIS, 2004). Segundo Florêncio *et al.* (2016), essa característica também se traduz em um impacto ambiental reduzido, uma vez que a diminuição na quantidade de cimento utilizado contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Adicionalmente,

a eliminação do uso de fôrmas e a capacidade de reutilizar resíduos, aliados à habilidade de construir paredes com materiais compostos por uma parcela reciclada, reforçam a redução do impacto ambiental. Somado a esses benefícios, a tecnologia de impressão 3D também oferece um cenário fértil para pesquisa e inovação, à medida que os especialistas exploram novos materiais, processos e aplicações, com um enfoque na criação de soluções mais sustentáveis, eficientes e duráveis.

A tecnologia também oferece flexibilidade de design e personalização, o que permite aos projetistas criarem estruturas complexas e formas únicas que seriam difíceis de produzir por meio de métodos tradicionais de construção. Já a capacidade de personalização surge como um diferencial significativo, possibilitando a adaptação das estruturas às necessidades específicas de cada projeto, o que é especialmente vantajoso para empreendimentos de arquitetura singular e design personalizado. Adicionado a isto, a tecnologia pode ser empregada em locais de difícil acesso ou ambientes hostis, onde a logística da construção convencional seria complexa e desafiadora (KHOSHNEVIS, 2004; LIM *et al.*, 2012). Um exemplo notável disso será discutido no tópico 5.1, em que uma obra realizada em um deserto quente demonstrará como a impressão 3D eliminou a necessidade de tendas de proteção, prática comum em canteiros de obras tradicionais.

A otimização do processo de gerenciamento de projetos e obras é um dos aspectos mais relevantes no cenário da construção civil. Essa indústria muitas vezes enfrenta desafios em coordenar eficientemente os diversos processos envolvidos em um empreendimento. Nesse contexto, a aplicação dessa tecnologia pode ter impactos significativos sobre a gestão de projetos, contribuindo para a redução de riscos e a mitigação de pontos críticos durante o andamento da obra, incluindo possíveis erros de interpretação, execução e logística (FLORÊNCIO *et al.*, 2016).

Ademais, a tecnologia 3D proporciona maior confiabilidade aos projetos. Antes, muitas etapas dependiam inteiramente da mão de obra humana, o que poderia resultar em imprecisões ou atrasos (WARSAWSKI, 1999). No entanto, com a integração de maquinário informatizado, muitos pacotes de trabalho podem ser executados de maneira mais precisa e segura, elevando os padrões de segurança no canteiro de obras. Essa abordagem também tem impacto direto no controle de custos, uma vez que a previsibilidade das atividades aumenta, evitando surpresas no

orçamento e garantindo uma alocação mais eficiente de recursos (FLORÊNCIO *et al.*, 2016).

Durante a sua apresentação na 20ª Conferência Internacional de Geometria e Gráficos em 2022, o Prof. Benjamin Dillenburger destacou que a fabricação digital não apenas aprimora a precisão e segurança em projetos de construção, mas também desempenha um papel fundamental na promoção da colaboração interdisciplinar. Ele enfatizou a importância dessa abordagem em projetos que abrangem diversas disciplinas, reunindo equipes compostas por estudantes e especialistas de diferentes campos. Nessa perspectiva, como arquiteto e pesquisador, Dillenburger deixa claro que a colaboração entre especialistas em áreas como tecnologia, design e engenharia é indispensável para o sucesso de projetos inovadores e sustentáveis.

Apesar das inúmeras vantagens que a impressão 3D do concreto traz para a indústria da construção, é crucial reconhecer os desafios que ainda precisam ser superados para sua plena adoção e sucesso. Um desses desafios, como já citado, está nos altos custos iniciais, tanto os equipamentos quanto a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais requerem investimentos significativos. Além disso, a escalabilidade do processo é uma questão a ser enfrentada, especialmente para a impressão de estruturas maiores e mais complexas. As máquinas existentes possuem limitações de altura e adaptação, o que impõe restrições nas dimensões e complexidade das edificações (LIM *et al.*, 2012; BUSWELL *et al.*, 2007).

A disponibilidade de mão de obra especializada também é uma preocupação, uma vez que a automação da fabricação aditiva pode alterar as dinâmicas tradicionais de trabalho no canteiro de obras. Enquanto a automação reduz a necessidade de trabalho braçal, há uma demanda crescente por mão de obra intelectual para operar e supervisionar essas tecnologias avançadas. Outrossim, a etapa de pós-processamento, que envolve tratamentos adicionais para melhorar a qualidade dos componentes impressos, também deve ser considerada.

No entanto, é importante também considerar o impacto socioeconômico dessas inovações. Enquanto as vantagens da automação são claras na redução da necessidade de trabalho braçal, essa mudança também pode gerar desafios relacionados ao desemprego e à requalificação dos profissionais envolvidos. A

substituição gradual de tarefas repetitivas por tecnologias avançadas pode afetar trabalhadores que dependem dessas funções.

Em síntese, a introdução da manufatura aditiva na construção civil, por meio da impressão 3D de concreto, oferece uma série de vantagens que prometem revolucionar a indústria, tornando-a mais eficiente, personalizada e sustentável. Entretanto, é necessário enfrentar e resolver os desafios inerentes a essa tecnologia. O compromisso em superar obstáculos como custos, escalabilidade, mão de obra, materiais, pós-processamento e certificação é essencial para a adoção bem-sucedida dessa inovação. Somente por meio desse empenho conjunto será possível efetivamente integrar a impressão 3D de concreto no setor da construção, maximizando seus benefícios e minimizando suas limitações. Na análise SWOT apresentada na tabela abaixo, são condensados as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças dessa tecnologia aditiva cimentícia.

Tabela 6- Análise SWOT da Manufatura aditiva aplicada a construção de elementos cimentícios.

<b>FORÇA (STRENGTHS)</b>	<b>FRAQUEZAS (WEAKNESSES)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiência de Produção</li> <li>• Personalização</li> <li>• Custos de Transporte Reduzidos</li> <li>• Possibilidade de construir em locais hostis</li> <li>• Redução de Resíduos</li> <li>• Menor impacto Ambiental</li> <li>• Liberdade Geométrica</li> <li>• Custos potencialmente reduzidos (longo prazo)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade e limitação de materiais</li> <li>• Investimento inicial Alto</li> <li>• Falta de regulamentação</li> <li>• Escalabilidade</li> <li>• Mão de Obra especializada</li> </ul>
<b>O IMPACTO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO</b>	
<b>OPORTUNIDADES (OPPORTUNITIES)</b>	<b>AMEAÇAS (THREATS)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Avanços na Indústria Espacial</li> <li>• Desenvolvimento de Novos Materiais</li> <li>• Setores Diversificados (Edifícios, infraestrutura, urbanismo, mobiliário...)</li> <li>• Potencial de reduzir o Déficit Habitacional: habitações de baixa renda e construção de abrigos de emergência (KHOSHNEVIS, 2004; FLORÊNCIO <i>et al.</i>, 2016).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aceitação do setor</li> <li>• Riscos de Qualidade</li> <li>• Concorrência tradicional</li> </ul>

Fonte: Elaboração própria (2023).

## 5. A TECNOLOGIA TRIDIMENSIONAL NA PRÁTICA

Com o contínuo avanço das tecnologias de impressão 3D aplicadas ao concreto, o cenário da indústria da construção civil tende a passar por um processo de evolução, resultando em maior eficiência, flexibilidade de design e sustentabilidade. Tanto no Brasil quanto no mundo, casos de sucesso têm ilustrado o potencial dessa abordagem inovadora, demonstrando sua capacidade de reinventar a maneira como edifícios e estruturas são concebidos e construídos.

À medida que a prototipagem rápida ganha destaque no campo da construção civil, diversos exemplos inspiradores de sucesso surgem em diferentes partes do mundo, evidenciando não apenas o seu potencial, mas também como esta abordagem está impulsionando a indústria rumo a novos horizontes.

Um caso claro é a Vila executada pela Dar Al Arkan, uma empresa imobiliária que alcançou o feito de erguer uma vila de três andares na Arábia Saudita. Esse projeto inovador ostenta o título atual de edifício mais alto do mundo construído com tecnologia de impressão 3D (COBOD, 2022). Sua realização não apenas destaca os avanços tecnológicos, mas também enfatiza a viabilidade econômica e os benefícios ambientais dessa abordagem revolucionária.

Ainda no contexto internacional, destaca-se o Escritório do Futuro, uma criação do escritório de arquitetura Killa Design em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos, que exemplifica outra vertente da manufatura aditiva na construção. Esse projeto se diferencia por sua singularidade estética e evidencia a versatilidade da tecnologia. A estrutura completa, incluindo o edifício e o mobiliário interno, foi produzida por meio da tecnologia de impressão 3D (ARCHDAILY, 2017).

No Brasil, mais especificamente no nordeste do país, destaca-se um exemplo da aplicação da manufatura aditiva na construção civil. A primeira casa construída no país por meio da tecnologia de impressão 3D está localizada em Macaíba, na região metropolitana de Natal, no Rio Grande do Norte. Essa habitação inovadora é resultado de uma colaboração entre estudantes de engenharia civil da Universidade Potiguar e a startup 3D Home Construction. Nesse caso, a equipe responsável enfrentou desafios únicos e obteve valiosas lições sobre como a manufatura aditiva pode

revolucionar a construção, mesmo em condições desafiadoras. Esse projeto pioneiro ilustra de maneira clara como a prototipagem rápida pode ser adaptada e aplicada localmente, abrindo novos caminhos para a construção de edifícios em diferentes localidades, de forma mais eficiente e sustentável.

Este trabalho tem como um dos objetivos explicar o uso da impressão tridimensional nas construções, tanto a nível nacional quanto global. Para alcançar esse propósito, serão explorados os estudos de caso de sucesso mencionados anteriormente, detalhando o projeto da Dar Al Arkan, a arquitetura inovadora do Escritório do Futuro e a experiência brasileira de aplicar essa técnica no contexto nordestino. Ao analisar esses exemplos, torna-se evidente como a impressão 3D está redefinindo os limites da arquitetura e engenharia, moldando um futuro no qual tecnologia, criatividade, eficiência e sustentabilidade se unem para transformar o setor da construção.

### **5.1. A Vila / Dar Al Arkan**

No cenário atual da construção, a tecnologia de fabricação aditiva cimentícia está desempenhando um papel cada vez mais relevante, transformando a maneira como os edifícios são projetados e construídos. Um exemplo notável desse avanço é o pioneiro projeto da Dar Al Arkan, a principal incorporadora imobiliária da Arábia Saudita, sediada em Riade. A empresa ousou em concretizar uma vila de três andares utilizando uma impressora 3D de tecnologia extrusiva de concreto da 3D COBOD INTERNACIONAL, uma conquista que representa um passo significativo na evolução do setor.

Figura 32- A Vila: edifício mais alto do mundo impresso em 3D.



Fonte: COBOD (2022).

Localizada na região de Shams Al Riyadh, a noroeste da capital Riade, essa vila erguida pela Dar Al Arkan demonstra a eficácia da impressão 3D na construção. Em um período de 26 dias, o edifício tomou forma como uma inovação exemplar, estritamente em conformidade com os códigos de construção. Esse feito demonstra que a tecnologia e a conformidade regulamentar podem caminhar em harmonia.

Dentro de um terreno abrangendo 12.000.000m<sup>2</sup>, a vila ocupa uma área total de 345m<sup>2</sup>. Com uma altura de 9,9 metros, esse edifício erguido com uso da manufatura aditiva se destaca como a estrutura mais alta do mundo construída com essa tecnologia. Esse projeto não só demonstrou a viabilidade econômica da impressão 3D ao utilizar materiais locais de baixo custo, como também resultou em uma economia de energia de 30% e na redução significativa de desperdícios na construção, quando comparado com os métodos tradicionais de construção (COBOD, 2022).

Figura 33- Fachadas da Vila, edifício impresso em 3D pela empresa Dar Al Arkan.



Fonte: COBOD (2022).

Esse edifício foi projetado para atender às exigências modernas. O primeiro andar, abrangendo uma área de 130 metros quadrados, possui um salão com várias áreas de convivência, uma cozinha e dois banheiros. O segundo andar, com 140 metros quadrados, abriga três quartos, incluindo uma suíte, dois banheiros, uma sala de estar e uma varanda.

Já o terceiro andar, menor em dimensão, constitui um anexo do telhado. Nesse espaço, reside um quarto destinado a prestadores de serviço, acompanhado de um banheiro, um salão multiuso e uma lavanderia. Curiosamente, na Arábia Saudita, um edifício com essas características é classificado como possuindo apenas dois andares mais um anexo, dado que o terceiro andar é menor do que os dois primeiros.

Figura 34- Ambientes internos da vila: salão com áreas de convivência.



Fonte: COBOD (2022).

A realização desse projeto foi possível graças à solução D.fab, uma colaboração entre a COBOD e a empresa CEMEX. Essa solução permitiu a obtenção de 99% dos materiais de concreto localmente, o que resultou em um gasto de menos de 10.000 euros para todos os materiais impressos. O processo de construção ocorreu no ano de 2022, nos meses de agosto e setembro, em um deserto quente onde as

temperaturas frequentemente ultrapassam 40 graus Celsius. A utilização da fabricação aditiva eliminou a necessidade de tendas de proteção, uma prática comum em canteiros de obras convencionais (COBOD, 2022).

Figura 35- Estrutura montada com maquinário da 3D COBOD INTERNACIONAL.



Fonte: COBOD (2022).

A flexibilidade de design proporcionada pela tecnologia de impressão 3D é um dos pontos mais notáveis. Essa flexibilidade permitiu que a Dar Al Arkan personalizasse facilmente acabamentos e estilos, oferecendo aos futuros clientes uma experiência de personalização única. Com essa habilidade, a empresa está definindo um novo padrão de excelência no setor imobiliário, projetando residências sob medida para atender aos gostos individuais de cada cliente.

Wael Al Hagen, gerente de projetos de impressão de construção 3D da Dar Al Arkan, destacou o potencial transformador da impressão 3D na construção. Ele enfatizou que essa abordagem permite uma maior flexibilidade de design, aumenta a produtividade e otimiza a eficiência de custos (COBOD, 2022).

A estrutura do maquinário da 3D COBOD INTERNACIONAL, adotando a forma de um pórtico, foi instalada sobre blocos de concreto fabricados manualmente, assim como a laje do piso, que também seguiu métodos tradicionais de construção (COBOD,

2022). Essas circunstâncias levantam questionamentos pertinentes sobre a atual capacidade da indústria da construção civil em adotar de maneira mais abrangente a tecnologia de impressão 3D. Isso evidencia que, em muitos casos, a impressão 3D ainda é utilizada de maneira limitada, coexistindo com métodos convencionais de construção. Essa constatação sugere que a revolução da impressão 3D na construção está em seus estágios iniciais de desenvolvimento, indicando que ainda há um caminho a percorrer antes que a tecnologia possa ser plenamente integrada em projetos construtivos.

Figura 36- A vila durante o processo de construção.



Fonte: COBOD (2022).

Apesar dos notáveis avanços já alcançados na Europa no campo da impressão 3D de concreto, com conquistas como o edifício de três andares erguido com sucesso

na Alemanha pela empresa PERI 3D Construction em 2021 (figura 37), a Dar Al Arkan desempenhou um papel crucial ao levar a Ásia a entrar nesse cenário, ao concluir a maior estrutura impressa em 3D até o momento. Ainda que a América do Norte possa estar à frente em termos de quantidade de novos edifícios produzidos por meio da impressão 3D, é na Europa e no Oriente Médio que se percebe um avanço significativo ao explorar ao máximo a tecnologia de impressão de construção 3D para a criação de edifícios cada vez mais grandiosos. Essa tendência além de evidenciar a busca incessante por soluções inovadoras no setor da construção, também destaca o comprometimento de diversas regiões em impulsionar as fronteiras da criatividade arquitetônica e engenharia construtiva, moldando, assim, o futuro das edificações de maneira revolucionária.

Figura 37- Primeira casa impressa em 3D na Alemanha, recebeu o “Prêmio Alemão de Inovação”.



Fonte: PERI 3D CONSTRUCTION (2021).

## 5.2. Escritório do Futuro / Killa Design

Além de explorar o já mencionado projeto da Vila, executado pela empresa de desenvolvimento imobiliário Dar Al Arkan e que atualmente detém o título de edifício mais alto do mundo construído com tecnologia de impressão 3D, também é interessante observar outras facetas dessa inovação tecnológica. Um exemplo pioneiro nesse contexto é o renomado Escritório do Futuro, concebido pelo escritório de arquitetura Killa Design em Dubai, nos Emirados Árabes Unidos. Esse projeto se destaca por sua estética singular, ressaltando a versatilidade e personalização proporcionadas pela tecnologia de impressão tridimensional.

Figura 38- Fachadas do Escritório do futuro projetado feito com MA.

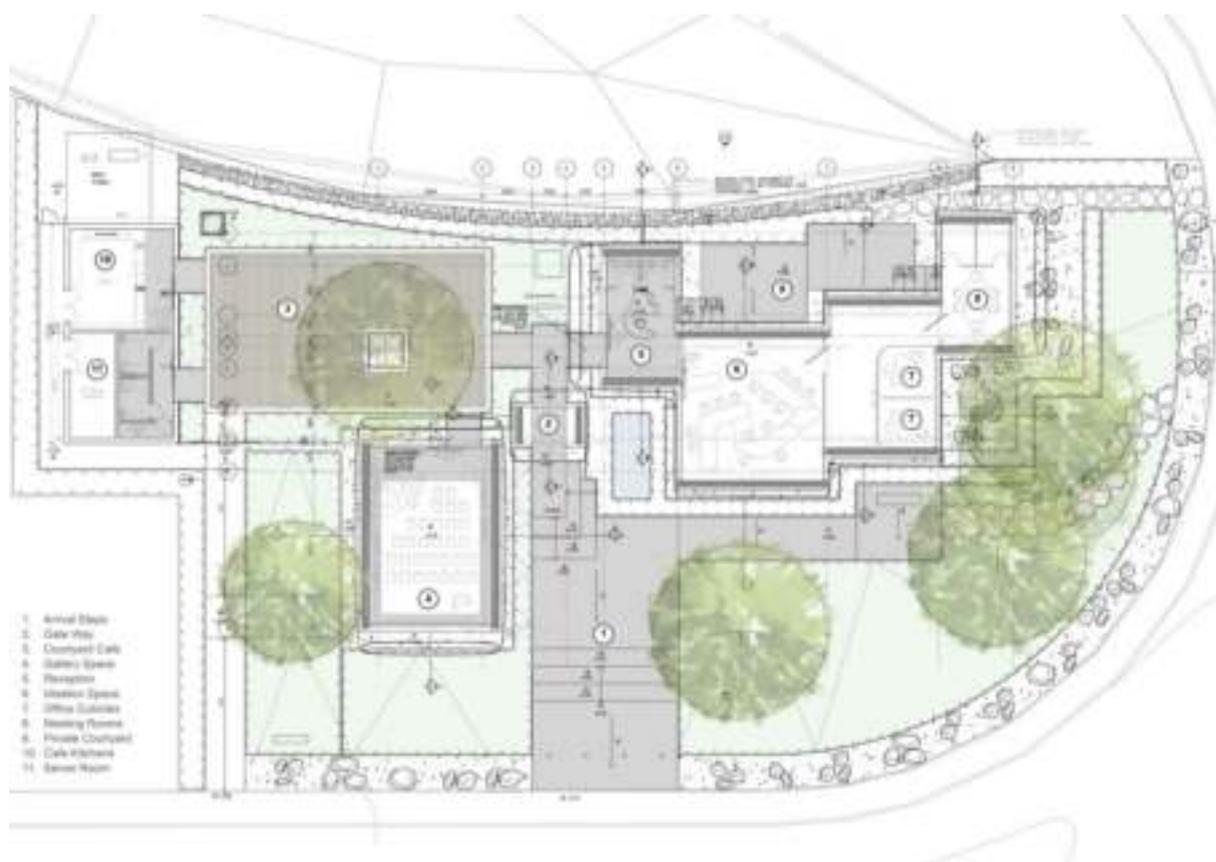


Fonte: ARCHDAILY (2017).

A Killa Design se destacou ao criar o edifício completamente funcional e permanentemente ocupado, construído em 3D. Para a materialização da estrutura, foi

empregada a técnica de extrusão de material utilizando concreto como base. Ele foi inaugurado em maio de 2016, o edifício de 250 metros quadrados oferece um espaço destinado a escritório e reuniões, com capacidade para até 16 pessoas. Além de sua utilidade principal, sua versatilidade possibilita a adaptação do espaço para exposições especiais, workshops e outros eventos relacionados a museus (MACRAE, 2016).

Figura 39- Planta Baixa do escritório do Futuro projetado por Killa Design.



Fonte: ARCHDAILY (2017).

O edifício, marcante por sua fachada arredondada com elementos de estilo retrofuturista, constitui um marco no universo da impressão 3D. Composto integralmente por componentes fabricados por impressoras 3D, tanto interna quanto externamente, ele apresenta uma abordagem inovadora no que tange ao design e à construção. No entanto, o projeto vai além da mera aparência impactante, incorporando uma visão ousada tanto no design quanto na construção, o que resulta em uma perfeita harmonia entre forma e funcionalidade.

Assim, diante dessa abordagem, os componentes estruturais, móveis internos, acessórios e detalhes foram produzidos por meio da modelagem aditiva, demandando a utilização de uma variedade de impressoras 3D. A formulação do composto cimentício, destinado à impressão da estrutura, surgiu de uma colaboração com equipes dos Estados Unidos e engloba uma combinação de concreto reforçado, gesso com fibras de vidro e plástico também reforçado com fibras. A aplicação desse composto se dava por meio da impressora, permitindo a criação de múltiplas camadas, cujas espessuras oscilavam entre 0,6 cm e 3 cm (ARCHDAILY, 2017).

Figura 40- Interior do escritório do futuro com mobiliário impresso em 3D.



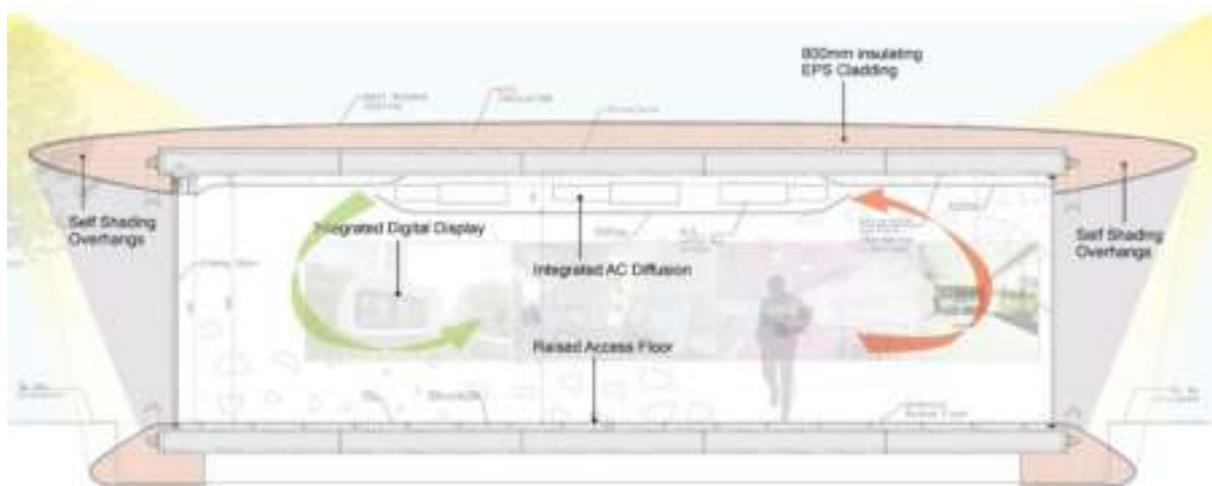
Fonte: ARCHDAILY (2017).

A máquina utilizada na construção do edifício apresentava dimensões aproximadas de 6,1 metros de altura, 36,6 metros de comprimento e 12,2 metros de

largura. Equipada com um braço robótico automatizado fornecido pela empresa de construção chinesa WinSun, essa impressora conduziu o processo de impressão e foi montada em um impressionante prazo de apenas 2 dias. Quanto à própria construção, o processo foi concluído ao longo de 17 dias, enquanto a realização dos projetos de interiores e paisagismo exigiram cerca de três meses para serem totalmente finalizados.

Com o intuito de aprimorar a eficiência energética em um clima extremamente quente, como é o caso dos Emirados Árabes Unidos, onde as temperaturas frequentemente ultrapassam os 45°C, o edifício adotou um sistema de revestimento super isolado. Esse revestimento também foi produzido por manufatura aditiva, garantindo a sua precisão e eficácia. Além disso, para otimizar o desempenho térmico, foi aplicado um revestimento isolante com uma espessura robusta, chegando a 800mm (ARCHDAILY, 2017).

Figura 41- Corte esquemático exemplificando sistema adotado para desempenho térmico.



Fonte: ARCHDAILY (2017).

Além dos avanços tecnológicos, outro aspecto a ser destacado é a considerável redução de custos. A mão de obra envolvida no processo de impressão contou com um técnico encarregado de monitorar a operação da impressora, uma equipe de sete pessoas responsável pela instalação dos componentes no local e um grupo de empreiteiros cuidando dos sistemas mecânicos e elétricos. Isso resultou em uma redução de mais de 50% nos custos de mão de obra em comparação com edifícios convencionais do mesmo porte. É importante ressaltar que, além dos benefícios econômicos, a eficaz minimização do desperdício no local de construção

desempenhou um papel fundamental na promoção da sustentabilidade do projeto (MACRAE, 2016).

Figura 42- Áreas de convivência versáteis e circulações internas.



Fonte: KILLA DESIGN (2016).

O Escritório do Futuro está inserido na estratégia dos Emirados Árabes Unidos para se consolidar como um centro de inovação e tecnologias. Com um custo de

construção estimado em apenas US\$ 140.000, o escritório incorpora os mais recentes avanços em tecnologia emergente para edifícios, além de oferecer um ambiente de alta qualidade, confortável, bem iluminado e socialmente envolvente para seus ocupantes. Assim, ao evidenciar o potencial da impressão 3D na arquitetura, o projeto ilustra de maneira concreta como a tecnologia pode transformar a maneira como concebemos e construímos os espaços que habitamos.

### 5.3. Casa unifamiliar / 3D Home Construction

A primeira casa construída no Brasil utilizando tecnologia de impressão 3D representou um avanço significativo na indústria da construção civil no Brasil. Localizada no município de Macaíba, na região metropolitana de Natal, Rio Grande do Norte, essa habitação foi construída em 2018 utilizando um processo de extrusão de material cimentício, abrindo caminho para novas abordagens na edificação de estruturas.

Figura 43- Primeira casa construída em impressora 3D no Brasil.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

O projeto da casa foi desenvolvido por um grupo de estudantes de engenharia civil da Universidade Potiguar, sob a supervisão do Prof. Dr. André Felipe Oliveira de Azevedo Dantas. Os alunos Iago Felipe Domingos da Silva e Allynson Aarão César Xavier, este último entrevistado para o presente estudo, lideraram a iniciativa como parte do trabalho final do curso de engenharia civil. Dessa colaboração nasceu a Startup 3D Home Construction, responsável por esse projeto pioneiro, e desde então o grupo vem se dedicando intensamente à exploração e aprimoramento das técnicas de impressão 3D.

Com uma área total de 66,32 m<sup>2</sup> e pé direito de 2,40m, a casa atende aos padrões de habitação de interesse social (HIS) e foi construída com uma laje radier tradicional. A instalação da máquina no local levou apenas um dia, envolvendo a colocação de trilhos e a montagem de toda a estrutura necessária. Além disso, as instalações mecânicas e elétricas também foram concluídas, e após testes, a máquina estava pronta para operação em um dia. Após a configuração, o processo de impressão foi projetado no software, com um tempo total estimado de 48 horas, considerando o cenário ideal de funcionamento sem interrupções e imprevistos.

Figura 44- Planta baixa da casa impressa pela Startup 3D Home Construction.



Fonte: LAGE (2020).

Ao longo do desenvolvimento, o equipamento enfrentou uma série de desafios que exigiram ajustes nos sistemas de bombeamento e extrusão. Essas adaptações foram realizadas diretamente no canteiro de obras, o que inevitavelmente impactou o cronograma inicial, levando a um prazo de conclusão estendido para dois meses. No entanto, como ressaltado por Allynson Xavier, as condições climáticas adversas tiveram um impacto significativo no processo de impressão, uma vez que a construção foi realizada em um local aberto. Além disso, a restrição de recursos financeiros também desempenhou um papel crucial ao limitar a capacidade de automatização do processo, adicionando desafios extras à equipe.

O desenvolvimento do primeiro protótipo de composto cimentício demandou aproximadamente seis meses. Foi necessário alcançar um equilíbrio que permitisse a adequada extrusão pela impressora 3D em múltiplas camadas, garantindo a resistência necessária. Nesse processo, parcerias acadêmicas estratégicas foram estabelecidas com o Centro de Excelência em Pesquisa Aplicada da Universidade Potiguar e com a pós-graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Essas colaborações desempenharam um papel importante ao proporcionar acesso a conhecimentos especializados, laboratórios de pesquisa e recursos adicionais que contribuíram para o sucesso do projeto.

Figura 45- Casa impressa em 3D com tecnologia brasileira.



Fonte: LAGE (2020).

No entanto, mesmo após a criação do composto cimentício, foram necessários efetuar ajustes adicionais no traço do concreto devido à detecção de fissuras e rachaduras durante a fase de construção. Mesmo com alterações feitas somente na metade do processo, o entrevistado constatou que essas modificações proporcionaram maior eficiência e economia, resultando em uma redução de 80 sacos de cimento em relação à estimativa inicial de 200 sacos.

O sistema de bombeamento operava manualmente, controlando o fluxo de material de maneira não automatizada. Dessa forma, o processo de operação da impressora demandava uma equipe composta por duas pessoas: uma responsável pela automatização dos demais equipamentos e outra alimentando manualmente a máquina. A ausência de recursos também impactou a escolha do bico de extrusão, pois não havia verba disponível para adquirir o bico ideal.

Figura 46- Obra na fase da extrusão do concreto.



Fonte: LAGE (2020).

Testes de temperatura revelaram que, sob alta incidência solar, as paredes externas alcançavam entre 37 e 38 graus Celsius, enquanto as paredes internas mantinham temperaturas mais amenas, entre 24 e 25 graus Celsius. Esse controle térmico foi possível ao ajustar corretamente as camadas das paredes, considerando o espaço de ar entre elas, sendo as externas mais espessas do que as internas.

A impressora, desenvolvida pelos estudantes com materiais reciclados de sucata, possui dimensões de 3 metros de altura, 7,6 metros de largura e 12 metros de comprimento. Sua capacidade de construir habitações de até 200 metros quadrados, com possibilidade de adaptação para estruturas maiores, é notável. A tecnologia empregada na impressora é semelhante à do Contour Crafting, com o software

derivado de tecnologias existentes que permitem a análise das características do concreto, como traço, viscosidade, composição e resistência. Assim, devido à utilização de materiais reciclados de sucata e à construção artesanal, a determinação de um preço para essa impressora se torna uma tarefa desafiadora, uma vez que a falta de investimento torna difícil mensurar seu valor de mercado.

Em termos financeiros, a impressora 3D permitiu custos estimados em 32 reais por metro quadrado, com expectativa de que esses custos diminuam ainda mais no futuro, podendo chegar a 20% a 50% dos valores registrados nessa primeira construção. O professor-doutor André Felipe Oliveira de Azevedo Dantas ressaltou a economia, custos e mão de obra, estimada em 30%.

Figura 47- Equipamento para impressão 3D utilizado.



Fonte: Acervo pessoal (2023).

O próximo passo da equipe é buscar investimentos para aprimorar ainda mais a tecnologia, aumentando sua precisão e confiabilidade. Dessa forma, eles visam o lançamento no mercado e a adoção dessa inovação nas universidades para pesquisa e desenvolvimento.

Allynson Xavier observa que, embora a manufatura aditiva exija investimentos contínuos devido à constante evolução tecnológica, seu uso em grande escala é mais viável do que em projetos individuais, como foi o caso deles. É importante enfatizar que a casa não foi finalizada devido à falta de recursos financeiros, uma vez que não houve investimentos externos para concluir a construção. Essa limitação orçamentária é um fator central que influenciou diretamente o resultado do projeto e impediu a instalação das esquadrias e telhado. No entanto, o grupo permanece otimista, apesar das dificuldades encontradas, demonstrando o desejo de expandir o potencial da tecnologia.

Figura 48- Casa concluída com equipamento de impressão 3D no RN.



Fonte: LAGE (2020).

Em suma, o projeto da primeira casa construída em impressora 3D no Brasil representou um marco na inovação da construção. Enfrentando desafios e explorando limites com resiliência, a equipe demonstrou como a tecnologia pode transformar a construção civil. Mesmo diante de limitações orçamentárias, climáticas e mecânicas, a equipe superou obstáculos e avançou rumo a um futuro em que a tecnologia de impressão 3D pode revolucionar a forma como edificações são concebidas e construídas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias de manufatura aditiva podem desempenhar um papel transformador na indústria da construção civil, revolucionando a forma de se conceber, construir e habitar os espaços. Com foco especial nas técnicas de impressão 3D do concreto, essas inovações demonstraram um notável potencial para otimizar processos construtivos, aumentar a eficiência, reduzir o desperdício de materiais e abrir caminho para a criação de estruturas arquitetônicas personalizadas e inovadoras.

Ao considerar o panorama geral, a tecnologia apresenta capacidade de mitigar os impactos ambientais da construção civil. Ela além de possuir o poder de reduzir o desperdício de materiais e a geração de resíduos, também é competente para viabilizar a utilização de materiais mais sustentáveis, que possuem um menor dano ao meio ambiente em comparação com os materiais tradicionais. Isso se traduz em uma produção mais ágil, com ciclos mais curtos e personalização de produtos conforme necessidades individuais (KHOSHNEVIS, 2004). Ademais, outra vantagem é a redução de custos com mão de obra e tempo de construção, uma vez que a impressão 3D é um processo automatizado que requer menos intervenção humana.

Contudo, a substituição gradual do trabalho manual por máquinas levanta preocupações relacionadas ao desemprego, especialmente em áreas que dependem de tarefas repetitivas. Nesse contexto, uma solução viável é a requalificação dos trabalhadores afetados, preparando-os para operar e supervisionar as tecnologias avançadas. Isso mantém a relevância dos trabalhadores e também cria novas oportunidades de carreira. É importante ressaltar que abordar questões sociais mais amplas, como segurança no emprego e desigualdades socioeconômicas, e adaptar o sistema educacional às novas demandas do mercado de trabalho são passos cruciais, maximizando os benefícios da automação na construção civil e garantindo uma transição suave para todos os envolvidos.

A evolução histórica da manufatura aditiva ilustra como essa tecnologia evoluiu de uma ideia pioneira para uma ferramenta versátil e eficiente, moldando o futuro cenário da construção contemporânea. Apesar dos desafios iniciais, como altos custos, escalabilidade, mão de obra, aceitação da indústria, regulamentações

adequadas e a necessidade contínua de desenvolvimento tecnológico e pesquisa, o progresso é positivo. Os projetos ao redor do mundo atestam a aplicação bem-sucedida da impressão 3D na construção, e o futuro se apresenta promissor.

À medida que projetos globais, como a vila de três andares na Arábia Saudita, o Escritório do Futuro em Dubai e a primeira casa impressa em 3D no Brasil continuam a evidenciar a eficácia, versatilidade e possibilidades das tecnologias de impressão 3D na construção, fica mais claro o potencial dessas inovações para redefinir não apenas a estética dos edifícios, mas também os fundamentos econômicos e ambientais da indústria. A capacidade de personalizar estruturas de acordo com as necessidades específicas do projeto e solucionar desafios de construção em ambientes adversos, tudo isso com menor prazo e custo, é uma das evidências convincentes do valor duradouro da manufatura aditiva.

A busca incessante por conhecimento, regulamentações específicas e avanços tecnológicos promete moldar um futuro na construção que seja mais eficiente, tanto aqui na Terra como em lugares além dela. Com o potencial de resolver desafios urgentes e até mesmo expandir nossos horizontes para o espaço sideral, a exploração espacial se apresenta como um campo onde a manufatura aditiva também desempenha um papel relevante e está sob constante estudo. Tecnologias como o Contour Crafting e a D-shape, em colaboração com agências espaciais, oferecem uma perspectiva empolgante para a construção extraterrestre, utilizando materiais encontrados em outros planetas (CONTOUR CRAFTING CORPORATION, 2017; D-SHAPE, 2014).

Dentro desse contexto de inovação e possibilidades, as visitas e entrevistas realizadas no HubIC e no Laboratório de Impressão 3D em Concreto reforçam a importância de experimentar essa tecnologia em um ambiente real. A oportunidade de observar as impressoras 3D em pleno funcionamento e interagir com profissionais experientes proporcionou uma compreensão mais completa e prática dessa inovação. Essa imersão e a interação com especialistas enriqueceram ainda mais experiência e aprendizado.

No que diz respeito as normas regulatórias, é fundamental destacar que o progresso da manufatura aditiva na construção não deve ocorrer sem a devida regulamentação necessária em funcionamento. A normatização desse processo

desempenha um papel crucial na garantia da segurança, qualidade e confiabilidade das novas práticas construtivas. Iniciativas como a norma ISO/ASTM FDIS 52939 refletem o compromisso de padronizar e aprimorar a aplicação da manufatura aditiva na construção, considerando princípios de qualificação, elementos estruturais e de infraestrutura.

No entanto, a jornada de exploração dessas metodologias aditivas na construção civil não esteve isenta de desafios significativos, especialmente devido à ausência de normas e diretrizes específicas em vigor. A autora deste trabalho, por exemplo, enfrentou dificuldades ao buscar normas relacionadas, uma vez que, atualmente, não há no Brasil uma norma que regule diretamente a manufatura aditiva na construção civil. Ademais, a norma ISO/ASTM FDIS 52939, mesmo em processo de desenvolvimento, ainda não está disponível para orientar os profissionais da área. Essa lacuna normativa pode resultar em incertezas quanto à segurança, qualidade e conformidade dos projetos construídos com essas técnicas, gerando preocupações legítimas. Portanto, diante dessa carência regulatória, persiste a necessidade de um conjunto abrangente de regulamentações que ofereçam direcionamento claro para os profissionais da indústria, proporcionando um ambiente em que tanto os profissionais quanto os reguladores possam se orientar e aprimorar a aplicação da manufatura aditiva na construção civil com confiança.

Além disso, é importante destacar que a maior parte das referências disponíveis sobre o assunto está predominantemente em inglês ou em outras línguas estrangeiras. Apesar do conhecimento em inglês da autora deste trabalho, o uso frequente de terminologias técnicas em muitos artigos, livros e conteúdos relacionados à manufatura aditiva apresenta um desafio que exige mais tempo e atenção. A escassez de materiais em português dificulta a pesquisa e a compreensão das nuances técnicas, contribuindo para um processo de coleta de informações mais demorado e desafiador. Adicionalmente, as dificuldades encontradas na logística das visitas aos laboratórios e na realização das entrevistas acrescentaram uma camada extra de dificuldade e imprevisibilidade ao processo da pesquisa.

Dentro desse contexto, cabe ressaltar ainda que a impressão 3D representa um ponto crucial na evolução da construção. Ela desafia as limitações tradicionais, impulsiona a inovação e inspira uma nova era de criação de espaços habitáveis. As

dificuldades enfrentadas ao longo dessa jornada de pesquisa destacam a necessidade de investimento contínuo, tanto em termos de pesquisa quanto de regulamentação. Afinal, é por meio da superação desses desafios que a manufatura aditiva pode se firmar como uma abordagem sólida e confiável para a construção do futuro.

Em suma, as tecnologias de manufatura aditiva têm potencial para remodelar a indústria da construção civil de maneira profunda e impactante, trazendo consigo uma série de transformações e mudanças. Apesar dos desafios, o potencial transformador dessas tecnologias é inegável. O caminho a seguir envolve a colaboração entre especialistas, a elaboração de regulamentações sólidas e o compromisso contínuo com a inovação.

Sendo assim, é importante enfrentar os obstáculos remanescentes de maneira proativa, investindo em pesquisa, treinamento e desenvolvimento para superar as barreiras que possam limitar a adoção em larga escala. Com uma abordagem colaborativa entre os setores público e privado, é possível enfrentar esses desafios e permitir que a manufatura aditiva desempenhe um papel central na construção do futuro. Com todas essas peças no lugar, a MA tem o poder de redefinir não apenas a forma como construímos, mas também como concebemos o ambiente construído. O futuro da construção está sendo construído camada por camada, inspirando a próxima geração de soluções construtivas inovadoras.

## REFERÊNCIAS

ANELL, Lars Henrik. **Concrete 3D printer**. 2015. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Faculty Of Engineering Lth, Department Of Design Science, Lund University, Lund, 2015.

ARCHDAILY (org.). **Office of the Future / Killa Design**. 2017. Disponível em: <https://www.archdaily.com/875642/office-of-the-future-kill-a-design>. Acesso em: 20 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação de massa específica. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/ASTM 52900**: Manufatura Aditiva - Princípios Gerais - Terminologia. Rio de Janeiro, 2018. 25 p.

BUSWELL, R.: **Digital fabrication in the concrete industry**. In: Presentation at the 7th RILEM 276-TC Meeting, September 2018, Zurich. 2018.

BUSWELL, R.A. *et al.* 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 112, p. 37-49, out. 2018.

BUSWELL, R.A. *et al.* Freeform Construction: mega-scale rapid manufacturing for construction. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 16, n. 2, p. 224-231, mar. 2007.

COBOD (org.). **The tallest 3d printed building in the world is now in Saudi Arabia**. 2022. Disponível em: <https://cobod.com/the-worlds-tallest-3d-printed-building-is-now-in-saudia-arabia/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

CONTOUR CRAFTING CORPORATION (org.). **Offering Automated Construction of Various Types of Structures**. 2017. Disponível em: <https://www.contourcrafting.com/building-construction>. Acesso em: 31 ago. 2023.

CONTOUR CRAFTING CORPORATION (org.). **Technologies for Building Immediate Infrastructure on the Moon and Mars for Future Colonization**. 2017. Disponível em: <https://www.contourcrafting.com/space/>. Acesso em: 31 ago. 2023.

DBZ (org.). **Shotcrete 3D Printing (SC3DP) – 3D-Drucken von großformatigen Betonbauteilen.** 2019. Disponível em:

[https://www.dbz.de/artikel/dbz\\_Shotcrete\\_3D\\_Printing\\_SC3DP\\_3D-Drucken\\_von\\_grossformatigen-3303061.html](https://www.dbz.de/artikel/dbz_Shotcrete_3D_Printing_SC3DP_3D-Drucken_von_grossformatigen-3303061.html). Acesso em: 28 ago. 2023.

DILLENBURGER, Benjamin. **Additive Construction: digital building technologies** - Bridging Imagination with Materialisation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMETRY AND GRAPHICS, 2022, São Paulo. Disponível em: [http://icgg2022.pcc.usp.br/speaker\\_bd.html](http://icgg2022.pcc.usp.br/speaker_bd.html). Acesso em: 20 out. 2023.

DING, Lieyun; WEI, Ran; CHE, Haichao. Development of a BIM-based Automated Construction System. **Procedia Engineering**, [S.L.], v. 85, p. 123-131, 2014.

DINI, Enrico. **3D Printing.** 2009. Disponível em: <https://d-shape.com/3d-printing/>. Acesso em: 15 jun. 2023

D-SHAPE (org.). **Aerospace.** 2014. Disponível em: <https://d-shape.com/aerospace/>. Acesso em: 15 jun. 2023

D-SHAPE (org.). **Moon base.** 2014. Disponível em: <https://d-shape.com/Prodotti/moon-base/>. Acesso em: 15 jun. 2023

FARMER, Mark. **The Farmer Review of the UK Construction Labour Model.** Reino Unido: Construction Leadership Council (CLC), 2016. 80 p.

FLORENCIO, Eduardo Quintella *et al.* O futuro do processo construtivo? A impressão 3d em concreto e seu impacto na concepção e produção da arquitetura. **Blucher Design Proceedings**, Buenos Aires, Argentina, v. 3, n. 1, p. 305-309, dez. 2016.

GARDNER, Matthew *et al.* **Construktio**n: megascale 3d printing. 2013. 201 f. Dissertação (Mestrado) - Faculty of Engineering And Physical Sciences, University Of Surrey, Guildford, Reino Unido, 2013.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. **Additive Manufacturing Technologies:** 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2. ed. New York: Springer, 2014. 498 p.

GÜLLE, Nur Banu; SELÇUK, Semra Arslan. A Bibliometric Analysis on 3D Printed Concrete in Architecture. In: SANDHU, Kamalpreet *et al* (ed.). **Sustainability for 3D Printing**. Cham, Suíça: Springer, 2022. Cap. 5. p. 77-104.

ISO (org.). **ISO/ASTM FDIS 52939** Manufatura aditiva — Princípios de qualificação — Elementos estruturais e de infraestrutura para construção, 2023. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/81177.html>. Acesso em: 12 abril 2023.

JASSMI, Hamad Al; NAJJAR, Fady Al; MOURAD, Abdel-Hamid Ismail. Large-Scale 3D Printing: the way forward. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S.L.], v. 324, p. 012088, mar. 2018. IOP Publishing.

KHOSHNEVIS, B.; KWON, H.; BUKKAPATNAM, S. **Automated Construction using Contour Crafting**. Industrial And Systems Engineering. Los Angeles, p. 497-504. 2000.

KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. **Automation In Construction**. [S.L.], p. 5-19. jan. 2004.

KHOSHNEVIS, Behrokh. **Offering Automated Construction of Various Types of Structures**. 2004. Disponível em: <http://contourcrafting.com/building-construction/>. Acesso em: 01 Mar. 2023.

KILLA DESIGN (org.). **Office Of the Future**, 2016. Disponível em: <https://www.killadesign.com/portfolio/office-of-the-future/>. Acesso em: 20 jun. 2023.

KURMANN, Fabian. **Beton holt technologisch auf**. 2019. Disponível em: <https://www.vdi-nachrichten.com/technik/bau/beton-holt-technologisch-auf/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

LAGE, Rangel. **Primeira casa construída com impressora 3D no Brasil**. 2020. Disponível em: <http://rangellage.com.br/primeira-casa-construida-com-impressora-3d-no-brasil/>. Acesso em: 01 jul. 2023.

LIM, Sungwoo *et al*. Development of a Viable Concrete Printing Process. **28Th International Symposium on Automation and Robotics In Construction (Isarc 2011)**, Loughborough University, p. 665-670, 29 jun. 2011. International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC).

LIM, Sungwoo *et al.* Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**. [S.L.], v. 21, n. 1, p. 262–268, 2012.

LLORET, Ena *et al.* Complex concrete structures: merging existing casting techniques with digital fabrication. **Computer-Aided Design**, [S.L.], v. 60, p. 40-49, mar. 2015.

LOWKE, Dirk *et al.* Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. **Cement And Concrete Research**, [S.L.], v. 112, p. 50-65, out. 2018.

MACRAE, Michael. **The 3D Printed Office of the Future**. 2016. Disponível em: <https://www.asme.org/topics-resources/content/3d-printed-office-the-future>. Acesso em: 20 jun. 2023.

MAKERBOT (org.). **Makerbot Replicator 2x Now Shipping**, 2013. Disponível em: <https://www.makerbot.com/stories/news/replicator-2x-now-shipping/>. Acesso em: 31 agosto 2023.

MUIRHEAD-ALLWOOD, Sarah *et al.* Uncemented custom computer-assisted design and manufacture of hydroxyapatite-coated femoral components. **The Journal of Bone And Joint Surgery. British Volume**, [S.L.], v. 92B, n. 8, p. 1079-1084, ago. 2010.

NUNZIA, A. **Stampa 3D: il futuro dell'edilizia**. 2022. Disponível em: <https://www.3dnatives.com/it/stampa-3d-edilizia-240920219/#!>. Acesso em: 20 jun. 2023.

PANDA, Biranchi; PAUL, Suvash Chandra; TAN, Ming Jen. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. **Materials Letters**, [S.L.], v. 209, p. 146-149, dez. 2017.

PATEL, Prachi. **How 3-D Printing Could Break into the Building Industry**. 2019. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/how-3d-printing-could-break-into-the-building-industry/>. Acesso em: 28 ago. 2023.

PAUL, Suvash Chandra *et al.* Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. **Archives Of Civil And Mechanical Engineering**, [S.L.], v. 18, n. 1, p. 311-319, jan. 2018.

PERI 3D CONSTRUCTION (org.). **Germany's first 3D-printed home**, 2021. Disponível em: <https://www.peri3dconstruction.com/en/beckum/>. Acesso em: 17 jun. 2023.

PERROT, Arnaud; AMZIANE, Sofiane. 3D Printing in Concrete: general considerations and technologies. **3D Printing of Concrete**, [S.L.], p. 1-40, 8 abr. 2019.

REPRAP (org.). **Darwin/ Assembling Darwin Electronics**. 2013. Disponível em: <https://reprap.org/wiki/Darwin/AssemblingDarwinElectronics>. Acesso em: 12 abril 2023.

SCULPTEO (org.). **The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today**. 2016. Disponível em: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>. Acesso em: 12 abril 2023.

SHAHAB, Amir *et al.* **Smart dynamic casting or how to exploit the liquid to solid transition in cementitious materials**. In: 7th RILEM International Conference on Self- Compacting Concrete and 1st RILEM International Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, 2013.

SMARSLY, Kay *et al.* BIM-Based Concrete Printing. In: SANTOS, Eduardo Toledo; SCHEER, Sergio (ed.). **Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering**. [S.L.]: Springer, 2020. Cap. 67. p. 992-1002.

TAY, Yi Wei Daniel *et al.* Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete. **Virtual And Physical Prototyping**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 104-113, 20 jul. 2018.

TECHTUDO (org.). **Empresa chinesa constrói primeiro edifício do mundo com uma impressora 3D**. 2015. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/2015/01/empresa-chinesa-constroi-primeiro-edificio-do-mundo-com-uma-impressora-3d.ghtml>. Acesso em: 28 ago. 2023.

TURNER, Brian N.; STRONG, Robert; GOLD, Scott A.. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: i. process design and modeling. **Rapid Prototyping Journal**, [S.L.], v. 20, n. 3, p. 192-204, 14 abr. 2014.

VASILIC, Ksenija. **Additive manufacturing with concrete**. In: German Society for Concrete and Construction Technology (DBV), Berlin, Germany, 2020.

VOLPATO, Neri; CARVALHO, Jonas. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, Neri (org.). **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações de impressão 3d**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2017.

WARSAWSKI, Abraham. **Industrialized and Automated Building Systems: a managerial approach**. 2. ed. London: Routledge, 1999. 484 p.

WISHBOX (org.). **14 tipos de impressora 3d: veja como funciona cada uma**, 2020. Disponível em: <https://www.wishbox.net.br/blog/tipos-de-impressora-3d/>. Acesso em: 12 abril 2023.

WORLD ECONOMIC FORUM (org.). **The Fourth Industrial Revolution is about to hit the construction industry. Here's how it can thrive**. 2018. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2018/06/construction-industry-future-scenarios-labour-technology/>. Acesso em: 12 abril 2023.

WU, Peng; WANG, Jun; WANG, Xiangyu. A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry. **Automation In Construction**, [S.L.], v. 68, p. 21-31, ago. 2016

YOSSEF, Mostafa.; CHEN, An. **Applicability and Limitations of 3D Printing for Civil Structures**. Iowa State University. 2015.