

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IZABELLA LUYSE DE OLIVEIRA

**PERSPECTIVAS E BARREIRAS DA TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA
COM MATERIAL CIMENTÍCIO NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

São Paulo

2024

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

IZABELLA LUYSE DE OLIVEIRA

**PERSPECTIVAS E BARREIRAS DA TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA
COM MATERIAL CIMENTÍCIO NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**

Versão original

Monografia apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, para
obtenção do título de Especialista em Tecnologia
e Gestão na Produção de Edifícios.

Orientador:

Prof. Renata Monte

São Paulo

2024

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 à fonte.

Catálogo-na-Publicação

de Oliveira, Izabella Luyse

Perspectivas e barreiras da tecnologia de manufatura aditiva com material cimentício no setor da construção civil / I. L. de Oliveira -- São Paulo, 2024.

83 p.

Monografia (Especialização em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Poli-Integra.

1.Manufatura aditiva 2.Construção civil 3.Inovações tecnológicas
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Poli-Integra II.t.

Referência bibliográfica ao trabalho de monografia: Izabella Luyse de Oliveira. **PERSPECTIVAS E BARREIRAS DA TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA COM MATERIAL CIMENTÍCIO NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**. 2024. 83 p. Monografia (Especialidade em Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Orientador:

Instituição: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (*provável*)

Julgamento: _____

Examinador 1:

Instituição:

Julgamento: _____

Examinador 2:

Instituição:

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e ao meu irmão, verdadeiras fundações em minha vida, que são a base sólida sobre a qual construí meu caminho acadêmico e pessoal. São vocês que me fazem encontrar a força necessária para edificar meus projetos e enfrentar os desafios da vida, e que me mostram a minha capacidade de superá-los. Todo o meu esforço e dedicação têm como objetivo honrar o amor e os valores que vocês me ensinaram. Obrigado por serem meus pilares, meus exemplos e meus melhores amigos. Este trabalho é dedicado a vocês, com todo o meu amor e gratidão.

RESUMO

A manufatura aditiva, comumente conhecida como impressão 3D, vem ganhando destaque na construção civil, especialmente no uso de composições cimentícias. Esta tecnologia promete revolucionar a forma como se constrói, oferecendo vantagens em termos de eficiência, sustentabilidade e inovação. Nos últimos anos, essa tecnologia tem avançado significativamente, empresas e institutos de pesquisa ao redor do mundo têm desenvolvido novas técnicas e materiais que permitem a criação de estruturas mais complexas e duráveis. Exemplos notáveis incluem a construção de casas, pontes e outros elementos arquitetônicos utilizando impressoras 3D de grande escala. Um dos principais desafios é a falta de normas e regulamentações específicas para a construção aditiva com cimento e a indústria precisa desenvolver padrões que garantam a segurança, durabilidade e qualidade das estruturas impressas. Embora a manufatura aditiva possa reduzir custos a longo prazo, o investimento inicial em equipamentos e tecnologia ainda é alto e a adoção generalizada depende da redução desses custos e da demonstração de viabilidade econômica em larga escala. Programas de treinamento e estudos na área são essenciais para preparar os profissionais do setor para essa transformação. Espera-se que a inovação na impressão 3D cimentícia continue a acelerar, com melhorias constantes em materiais, técnicas de impressão e eficiência de processos, porém a colaboração entre a indústria, academia e governo será crucial para impulsionar esses avanços. O objetivo é explorar essa tecnologia inovadora, destacando tanto os benefícios quanto às limitações, com um enfoque específico no uso do concreto. A pesquisa busca contribuir para a disseminação e aprimoramento da técnica.

Palavras chaves: Manufatura aditiva, inovações tecnológicas, construção civil

ABSTRACT

Additive manufacturing, commonly known as 3D printing, has been gaining prominence in the construction industry, especially in the use of cementitious compositions. This technology promises to revolutionize the way buildings are constructed, offering advantages in terms of efficiency, sustainability, and innovation. In recent years, this technology has advanced significantly, with companies and research institutes around the world developing new techniques and materials that enable the creation of more complex and durable structures. Notable examples include the construction of houses, bridges, and other architectural elements using large-scale 3D printers. One of the main challenges is the lack of specific standards and regulations for additive construction with cement, and the industry needs to develop standards that ensure the safety, durability, and quality of printed structures. Although additive manufacturing can reduce long-term costs, the initial investment in equipment and technology is still high, and widespread adoption depends on reducing these costs and demonstrating economic viability on a large scale. Training programs and studies in the field are essential to prepare industry professionals for this transformation. It is expected that innovation in cement 3D printing will continue to accelerate, with constant improvements in materials, printing techniques, and process efficiency. However, collaboration between industry, academia, and government will be crucial to drive these advances. The goal is to explore this innovative technology, highlighting both the benefits and limitations, with a specific focus on the use of concrete. The research aims to contribute to the dissemination and improvement of the technique.

Key words: Additive manufacturing, innovation, construction industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ferramentas da Indústria 4.0	20
Figura 2 - Níveis de classificação de manufatura aditiva	26
Figura 3 - Fluxo de informação de processo convencional de manufatura aditiva	28
Figura 4- Propriedades e equipamentos necessários para 3DP com extrusão de material	30
Figura 5- Impressora 3D de concreto de pórtico	34
Figura 6- Impressão 3D de concreto por um braço robótico fixo	35
Figura 7- Impressão 3D de concreto por um grupo de robôs móveis	36
Figura 8- Impressora tipo delta	37
Figura 9- Anatomia de uma impressora 3D do tipo Delta	38
Figura 10- Impressora Móvel KARLOS putzmeister	39
Figura 11- Impressora Phoenix da Icon Build	41
Figura 12- Impressora Vulcan da Icon build	42
Figura 13 - Extrusão do CarbonX	42
Figura 14 - Catálogo CODEX da ICON	43
Figura 15 - House Zero (a) e seus acabamentos internos (b) e (c)	45
Figura 16 - Etapas construtivas da fundação (a) e da elevação das paredes (b)	46
Figura 17 - Processo de impressão (a) e acabamentos da construção (b) e (c)	46
Figura 18 - Andamento da construção (a) e vendas das casas impressas do condomínio (b)	47
Figura 19 - Hotel El Cosmico	49
Figura 20 - Projeto das edificações internamente (a) e externamente(b)	49
Figura 21 - Impressora modelo pórtico fornecido pela COBOD	50
Figura 22 - Construção impressa pela Dar Al Arkan	51
Figura 23 - Construção impressa pela Dar Al Arkan	52
Figura 24 - Bases do maquinário	53
Figura 25 - Primeiro casa impressa em 3D no Brasil.	54
Figura 26 - Planta Baixa da edificação	55
Figura 27 - Modelo 3D da casa do projeto Habita-se Maceió	56
Figura 28 - Planta baixa do complexo habitacional e espaços integrantes	56
Figura 29 - Laboratório do HUBIC	56
Figura 30 - Laboratório Hubic	58

Figura 31 - Espaço coworking Hubic	59
Figura 32 - Impressão de uma peça decorativa	59
Figura 33 – Banco mobiliário urbano	60
Figura 34 - Projeto da cozinha impressa	61
Figura 35 - Detalhe de cavidades na parede impressa	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Característica gerais das diferentes processos de manufatura aditiva	24
Tabela 2 - Descrição do código G (G-code)	29

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo principal	14
1.1.2	Objetivos específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.3	MÉTODOS DE PESQUISA	16
1.4	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO	17
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	
2.1	Produtividade e escassez de mão de obra na construção civil	18
2.2	Ferramentas da Indústria 4.0	19
2.3	Manufatura aditiva	21
2.3.1	Origem da manufatura aditiva	22
2.3.2	Manufatura aditiva aplicada à construção civil e suas vantagens	22
2.3.3	Nomenclaturas e Categorias de processos de manufatura aditiva	24
2.3.4	Processo de manufatura aditiva por extrusão de material	27
3.	APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO	
3.1	Icon Build	39
3.1.1	House Zero	43
3.1.2	A coleção Genesis no Wolf Ranch	46
3.1.3	Projetos futuros - El Cosmico	48
3.2	Cobod	49
3.2.1	Dar Al Arkan	50
4.	AÇÕES NO BRASIL	
4.1	Inova House 3D e 3D Home Construction	53
4.2	O HUBIC e a Impressão 3D de Concreto no Brasil	56

5.	DESAFIOS PARA O USO DA MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO	
5.1	Equipamentos	60
5.2	Materiais	60
5.3	Normas técnicas e modelos de dimensionamento	61
5.4	Cultura da construção civil: Resistência à impressão 3D e a predominância de tecnologias tradicionais	63
5.5	Interface com outros subsistemas na impressão 3D na construção civil: Desafios de integração e conectividade	66
6.	CONCLUSÕES	

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção é crucial para a economia global. Nos próximos anos, desempenhará um papel vital no progresso socioeconômico das principais economias emergentes, que estarão na linha de frente do aumento populacional mundial. De acordo com projeções da Organização das Nações Unidas (2019), a população global passará de 7,7 bilhões para 9,7 bilhões de pessoas até 2050.

De acordo com a ONU, estima-se que cerca de 65% da população mundial residirá em áreas urbanas até 2050 (URBANET, 2016). Esse panorama resultará em uma crescente necessidade de moradia e infraestrutura.

Diante do rápido aumento populacional global, é essencial criar técnicas de construção que minimizem o uso de recursos naturais e melhorem a eficiência nos locais de construção. No entanto, a indústria da construção civil enfrenta grandes desafios, incluindo baixa produtividade, escassez de mão de obra e a crescente demanda mundial por infraestrutura (FREITAS, 2021).

Um ponto importante a considerar é o impacto ambiental causado pela indústria da construção. Este setor, além de ter baixa eficiência produtiva, é altamente insustentável, liderando o consumo mundial de matérias-primas (CÂMARA BRASILEIRA, 2017). Além disso, responde por mais de 30% da demanda energética global e das emissões de dióxido de carbono associadas ao uso de energia e processos industriais (CDB, 2022).

A insustentabilidade da construção civil deve-se em grande parte ao principal material utilizado, que é o cimento. A produção deste material é notoriamente conhecida por suas elevadas emissões de carbono (PUNHAGUI, 2018).

Diante desse contexto, é fundamental buscar soluções mais eficientes e produtivas, com menor impacto ambiental, que possam ser implementadas com o auxílio da mecanização e que minimizem os desperdícios durante o processo produtivo.

Essa nova realidade, conhecida como Construção 4.0, baseia-se na incorporação de tecnologias avançadas para melhorar eficiência, produtividade e sustentabilidade em todo o ciclo de vida de um projeto de construção. A inclusão da construção civil nesse contexto requer uma mudança rápida, profunda e disruptiva no setor.

Nesse sentido, o uso de soluções tecnológicas avançadas, como o desenvolvimento de elementos construtivos a partir da modelagem de informações digitais, poderia resultar em processos produtivos mais eficientes, com maior controle e qualidade, menor dependência de mão de obra intensiva e menor tempo de execução, além de reduzir o desperdício de materiais.

Uma possibilidade é adotar a produção digital utilizando a tecnologia de impressão 3D. Esse método envolve a fabricação de objetos pela sobreposição de camadas de material, geralmente feita por máquinas automatizadas, a partir de um modelo digital.

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, é um método avançado de produção que possibilita a criação automática de peças com formas complexas, a partir de um modelo 3D desenvolvido no computador com auxílio de software de desenho assistido por computador (CAD) (GIBSON et al, 2014).

Recentemente, têm surgido novos métodos de fabricação em diversos segmentos industriais, o que tem provocado significativas transformações nos procedimentos de produção (URHAL, 2019). Acredita-se que a manufatura aditiva irá revolucionar os processos produtivos, abrangendo desde os mais básicos até os mais complexos, incluindo operações em fábricas altamente tecnológicas.

Essa tecnologia tem sido aplicada em setores industriais, automobilísticos, e inclusive no setor da medicina, devido às suas vantagens, como a capacidade de criar protótipos funcionais em tempo hábil, reduzir o tempo entre a concepção e a prototipagem, diminuir o esforço e ampliar o impacto do planejamento por meio de do design iterativo, alinhar melhor as organizações para acelerar a tomada de decisões, diminuir a intervenção humana, reduzir o desperdício de material e quebrar o modelo tradicional de cadeia de suprimentos, possibilitando a produção de produtos mais próximos do local de uso no momento necessário, melhorando o tempo de entrega.

Uma aplicação mais recente dessa tecnologia na construção civil pode aprimorar as estratégias convencionais de construção, reduzindo a necessidade de mão de obra, os altos investimentos de capital e a utilização de fôrmas.

O interesse pela utilização da manufatura aditiva na construção civil cresceu exponencialmente nos últimos anos, considerando que é um setor com baixa produtividade e tecnologias obsoletas em comparação com outros setores que já automatizaram e digitalizaram seus processos de

fabricação (EL-SAYEGH, 2020). Essa tecnologia promete trazer benefícios econômicos e ambientais, além de impactar os processos de projeto e construção.

Esses processos apresentam como vantagens, em relação ao processo construtivo convencional (FLORÊNCIO, 2016): (i) Redução de custos de fabricação e de tempo da obra; (ii) Precisão da execução; (iii) Redução do impacto ambiental; (iv) Otimização do processo de gerenciamento de projetos e obras; (v) maior facilidade logística; e (vi) Possibilidade de redução do déficit social/habitacional.

Graças à liberdade tridimensional mais ampla proporcionada pela manufatura aditiva, o interesse por suas aplicações em grande escala na construção está em ascensão (LIM, 2012). No entanto, apesar do avanço e desenvolvimento do campo, o processo ainda enfrenta uma série de desafios técnicos e operacionais (SCHUTTER, 2018).

Portanto, compreender os benefícios da manufatura aditiva e os obstáculos enfrentados pelo setor da construção civil são aspectos fundamentais para incentivar a industrialização e automação da área, constituindo o principal objetivo deste estudo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

Neste cenário, o objetivo deste estudo é discutir a manufatura aditiva com material cimentício como uma tecnologia alternativa para a construção civil no Brasil. Serão abordados os tipos de impressoras empregadas, as principais vantagens e desvantagens desse método, bem como os obstáculos que ainda impedem a sua ampla adoção.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar uma visão geral sobre a impressão 3D na construção civil, abordando sua origem, os tipos de impressoras mais comuns, suas aplicações, o mercado atual e sua compatibilidade com a construção civil;
- Discutir casos de aplicação da impressão 3D na construção de edifícios apresentando exemplos de como a tecnologia é utilizado na engenharia civil, tanto no Brasil quanto em outros países;
- Comparar a tecnologia de impressão 3D com outras tecnologias de construção de edifícios.
- Analisar comparativamente o cenário atual da tecnologia de manufatura aditiva em materiais cimentícios para a construção civil no Brasil, destacando as perspectivas e os desafios.

1.2 JUSTIFICATIVA

A seleção do tema deste trabalho foi motivada pelo desejo de investigar uma tendência inovadora dentro da engenharia civil: a manufatura aditiva. A engenharia civil sempre despertou grande interesse devido à sua capacidade de moldar o ambiente construído e influenciar a qualidade de vida. A manufatura aditiva, por sua vez, surge como uma alternativa disruptiva para transformar a forma como projetos e edifícios são realizados.

No Brasil, a indústria da construção civil ainda é predominantemente artesanal, caracterizada por baixa produtividade e alto desperdício, incluindo a geração de resíduos e perdas. Contudo, um método construtivo inovador, com potencial para impactar positivamente o processo tradicionalmente utilizado, está surgindo. A manufatura aditiva implica em novas abordagens no planejamento e execução de projetos.

Atualmente, há uma carência de estudos sobre a aplicação da manufatura aditiva na construção de edifícios no país, assim como a falta de trabalhos que analisem as perspectivas e desafios dessa tecnologia no cenário nacional. A investigação dessa tecnologia, que está despertando crescente interesse global, pode contribuir para a sincronização das tendências construtivas, fornecendo um embasamento teórico para a introdução dessa prática no Brasil.

1.3 MÉTODOS DE PESQUISA

A obtenção de dados para este estudo e o consequente atingimento dos seus objetivos foram conduzidos por meio de uma extensa revisão bibliográfica. Esta revisão abarcou a pesquisa e análise de informações em plataformas online, publicações científicas, dissertações e periódicos especializados. O intuito desta revisão foi identificar e compilar dados relevantes sobre a manufatura aditiva e sua utilização na indústria da construção. Ademais, foram conduzidas investigações acerca das técnicas e procedimentos já desenvolvidos neste campo, com o objetivo de compreender os desafios e as oportunidades deste setor em evolução constante.

As principais modalidades de manufatura aditiva foram identificadas de acordo com a categorização estabelecida pela ISO/ASTM 52900. Neste mesmo contexto, foram apresentados projetos previamente realizados que empregaram esta metodologia, tanto no Brasil quanto em outras regiões do mundo. Estes estudos visam a evidenciar a eficácia e a aplicabilidade da tecnologia na prática, ao demonstrar exemplos concretos e validados de sua implementação em projetos reais das empresas Icon Buil e COBOD.

Para a execução deste estudo, também foi realizada uma visita presencial ao Hubic, um espaço colaborativo dedicado a soluções *hardtech* e projetos pré-competitivos. Esta visita ofereceu uma oportunidade de interação direta com especialistas do DCLab - Laboratório de Impressão 3D em Concreto, permitindo a observação da tecnologia em funcionamento e a análise de objetos já produzidos. Essa interação proporcionou uma compreensão aprofundada das aplicações práticas da impressão 3D na construção civil.

1.4 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

A monografia “**PERSPECTIVAS E BARREIRAS DA TECNOLOGIA DE MANUFATURA ADITIVA COM MATERIAL CIMENTÍCIO NO SETOR DA CONSTRUÇÃO CIVIL**” foi estruturada para ser apresentada em cinco capítulos.

No **primeiro capítulo** foi abordada a relevância do tema em questão na Indústria da Construção Civil. Nesse contexto, apresentam-se os objetivos, a justificativa da pesquisa, o método utilizado para atingir os objetivos e a estrutura do trabalho adotada.

O **segundo capítulo** apresenta uma abordagem conceitual sobre a manufatura aditiva no contexto da construção civil. São analisadas as técnicas e maquinários existentes, bem como o concreto para impressão e suas limitantes.

O **terceiro capítulo** mostra aplicações da tecnologia no mundo, citando empresas que estão atuando na construção de edificações com uso da impressão 3D.

No **quarto capítulo** essa tecnologia é explorada no cenário brasileiro,

No **quinto capítulo**, identificam-se os principais desafios para o uso da manufatura aditiva.

No **sexto capítulo**, apresentam-se as considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Produtividade e escassez de mão de obra na construção civil

A construção civil é um dos principais setores econômicos mundiais, empregando aproximadamente 7% da população global economicamente ativa e respondendo por 13% do PIB gerado no planeta (MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE, 2017). Uma das maiores dificuldades encontrada pela indústria da construção é a baixa produtividade e uma demanda mundial crescente por infraestrutura.

Diante do amplo crescimento da população mundial, é fundamental o desenvolvimento de processos que reduzam o consumo de matérias primas e que desenvolvam uma maior produtividade dentro do canteiro de obras.

De acordo com Dozzi et al. (1995), define-se produtividade como a relação entre a quantidade de determinado recurso (geralmente horas trabalhadas, expressas como homem/hora) utilizado para se obter um produto (volume de concreto, por exemplo). E seu crescimento na construção civil foi em média de 1% ao longo de duas décadas, já o crescimento da economia mundial no mesmo período foi de 2,8% (BARBOSA; WOETZEL; MISCHKE, 2017).

A falta de produtividade e escassez de mão de obra faz com que a indústria busque soluções por meio da tecnologia, representada pela automatização cada vez mais intensa dos processos produtivos. No caso da indústria da construção civil, por ser um dos setores menos automatizados e conseqüentemente mais dependentes de trabalho manual, existem grandes esforços na busca de alternativas para suprir esta iminente ausência de mão de obra.

Diante da tendência de escassez de mão de obra e aumento da demanda por obras civis, em meio à era da indústria 4.0 e suas inovações tecnológicas, a manufatura aditiva surge como uma possível resposta (PAN, 2024).

2.2 Ferramentas da Indústria 4.0

As Revoluções Industriais marcaram eras frequentemente associadas a inovações tecnológicas que aceleraram a produtividade e a economia mundial, mas que também provocaram profundas mudanças na sociedade em geral. Essas mudanças resultaram em novos comportamentos sociais, modelos políticos e perspectivas de mundo reformuladas, alinhadas com as novas realidades emergentes (PAN, 2024).

Segundo Lima Neto (2017), a primeira Revolução Industrial teve início na Inglaterra, no final do século XVIII, como resultado de diversas invenções tecnológicas e da criação de máquinas a vapor, que originaram o modo de produção fabril. Este período foi caracterizado pelo uso de novas fontes de energia, avanços na comunicação (exemplificados pelo surgimento do telégrafo) e pela especialização do trabalho. Socialmente, essas mudanças fomentaram a urbanização, a melhoria da qualidade de vida e o aumento da renda per capita.

Atualmente, conforme apontado por Kumar, Zindani e Davim (2019), a globalização e a economia de mercado aberto reformularam as políticas de mercado, tornando-as cada vez mais centradas no consumidor. Este novo contexto, conhecido como 4ª Revolução Industrial ou Indústria 4.0, iniciou a integração de tecnologias previamente independentes, como internet, telecomunicações e mecatrônica, gerando novos conceitos como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Impressão 3D, entre outros.

Conforme Kumar, Zindani e Davim (2019), a Indústria 4.0 se baseia no desenvolvimento das chamadas "fábricas inteligentes", cujos pilares centrais são a personalização e a flexibilização da produção. Esse modelo permite a manufatura desde grandes lotes de produtos padronizados até unidades exclusivas, dentro de uma cadeia produtiva descentralizada e globalizada. Para entender esse conceito da 4ª Revolução Industrial, é necessário compreender as ferramentas que compõem essa realidade, ilustradas na Figura 1 e discutidas a seguir, conforme Pan (2024).

Figura 1 - Ferramentas da Indústria 4.0



Fonte: CASADEI (2020)

Sistemas Integrados: Este conceito refere-se à interconexão de diversos sistemas de gerenciamento de fornecedores e clientes, permitindo o monitoramento em tempo real de toda a cadeia produtiva.

Inteligência Artificial: Os processos produtivos são otimizados e aprimorados com base na análise e processamento dos dados gerados por várias fontes, como sistemas computacionais e sensores em equipamentos. Esse processamento é realizado por meio de inteligência artificial, que inclui conceitos como Big Data e Machine Learning, onde o computador pode identificar parâmetros de comportamento, auxiliando o usuário na tomada de decisões.

Manufatura Aditiva: Este termo abrange um conjunto de tecnologias de fabricação digital capazes de criar objetos físicos a partir de um modelo digital. Além de permitir a customização do produto sem custos adicionais, essa tecnologia reduz significativamente o desperdício de recursos materiais e humanos. No contexto da construção civil, conhecida por sua baixa mecanização, a manufatura aditiva oferece uma oportunidade de integrar o setor ao universo da Indústria 4.0.

Realidade Aumentada: Refere-se à combinação de elementos virtuais com o mundo físico, criando um ambiente imersivo onde o usuário pode executar certas tarefas, aprimorando e

enriquecendo sua experiência. Um exemplo disso são os projetos tridimensionais acessados via QR Code, cuja visualização aparece sobre o papel.

Internet das Coisas: Trata-se de um ambiente digital em que diversos dispositivos estão interligados pela internet, utilizando sensores que geram dados em tempo real. Esses dados são armazenados em uma base de dados, permitindo que o histórico de funcionamento registrado seja processado posteriormente.

Simulação: Com o avanço da computação, hoje é viável reproduzir virtualmente um produto e testá-lo utilizando combinações de inúmeras variáveis baseadas em parâmetros reais. Isso possibilita que o produto seja fabricado com maior precisão e qualidade.

Robôs Autônomos: Embora o uso de robôs já esteja bem estabelecido na indústria, o diferencial no contexto atual é a capacidade dessas máquinas operarem sem supervisão humana, atuando de maneira inteligente, colaborativa e autônoma. Isso possibilita um aumento na produção, ao mesmo tempo em que reduz os custos de mão de obra.

Computação em Nuvem: A computação em nuvem é um serviço de computação baseado na internet, operando em um ambiente compartilhado, que permite o processamento, visualização e armazenamento de dados de qualquer lugar, sem depender de uma plataforma física. O custo é proporcional à carga utilizada. Segundo Zhang, Cheng e Boutaba (2010), a computação em nuvem possui recursos de escalabilidade, permitindo que os proprietários de negócios comecem com uma infraestrutura pequena e ampliem os investimentos conforme a demanda aumenta.

Segurança da Informação: Dado que a indústria contemporânea depende amplamente da gestão de informações, é cada vez mais crucial desenvolver sistemas e dispositivos que assegurem a confidencialidade dos dados, protegendo a tecnologia empresarial e mantendo sua competitividade.

2.3 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva é a técnica de fabricação de objetos a partir do depósito de sucessivas camadas de materiais, com base em um modelo previamente estabelecido. Alguns setores da indústria vêm explorando a manufatura aditiva para otimizar as suas linhas de produção, sendo o setor aeroespacial, automotivo, de saúde e da construção civil, os que mais exploram (CAMACHO, 2017).

2.3.1 Origem da manufatura aditiva

A manufatura aditiva remonta à década de 1980, quando Charles Hull, engenheiro e cofundador da 3D Systems, desenvolveu e patenteou a primeira tecnologia comercial de impressão 3D, conhecida como estereolitografia (Stereolithography Apparatus - SLA). Esse processo inovador permitia a criação de objetos sólidos mediante a utilização de um laser que solidificava resinas líquidas em camadas finas (SCULPTEO, 2016).

As contribuições de Hull foram fundamentais para o avanço da tecnologia de impressão 3D. Em 1987, ele introduziu o formato de arquivo Stereolithography (STL), que se tornou um padrão na troca de dados para impressão 3D. Esse formato representa objetos como coleções de triângulos, formando uma malha tridimensional. Hull também desenvolveu o conceito de fatiamento digital, que simplificou a tarefa de impressão ao dividir um modelo 3D em camadas finas individuais, geralmente horizontais, que são impressas sucessivamente. Além disso, ele propôs a ideia 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 crucial reconhecer que muitos outros indivíduos e empresas também desempenharam papéis significativos no desenvolvimento contínuo dessa tecnologia ao longo dos anos. Essa colaboração coletiva tem sido essencial para o impressionante progresso da manufatura aditiva desde suas origens nos anos 1980 até a complexa e diversificada indústria que conhecemos atualmente.

2.3.2 Manufatura aditiva aplicada à construção civil e suas vantagens

O primeiro trabalho de manufatura aditiva na construção foi desenvolvido por Behrokh Khoshnevis na década de 1990 (KHOSHNEVIS, 2004). A partir da tecnologia denominada de *Contour Crafting* composta por um sistema de pórtico móvel, Khoshnevis (2004) conseguiu depositar o material de impressão nos lugares desejados, sem a utilização de forma ou de mão de obra.

Após o trabalho pioneiro de Khoshnevis (2004), outros métodos de manufatura aditiva foram desenvolvidos. No entanto, atualmente, a técnica de impressão 3D de concreto mais popular é

a por extrusão. Esse método é baseado na deposição de um filamento contínuo pelo bico da extrusora em sucessivas camadas (MOHAN, 2021).

O primeiro trabalho publicado sobre impressão 3D de concreto por extrusão foi desenvolvido na Universidade de Loughborough no final da década de 2000 (LIM et al., 2012). A partir do ano de 2010, inúmeros trabalhos com o uso da extrusão como processo de manufatura aditiva na construção foram desenvolvidos (KAZEMIAN et al., 2017; PANDA; PAUL; TAN, 2017; BUSWELL et al., 2018; RUBIN, 2021; RUBIN; HASSE; REPETTE, 2021).

A tecnologia de manufatura aditiva na construção civil promete minimizar determinadas fragilidades encontradas no setor em questão. Segundo Florêncio (2016) é apresentando como principais vantagens, em relação ao processo construtivo convencional, os seguintes itens:

Redução de custos e tempo de construção: A automatização do processo construtivo permite realizar mais trabalho em menos tempo. O uso dessa tecnologia reduz diretamente a necessidade de mão de obra braçal e diminui significativamente o desperdício de materiais.

Precisão na execução: A tecnologia CAD/CAM possibilita que o projeto digital seja transmitido diretamente para as máquinas de produção. Isso elimina a necessidade de interpretação do projeto por intermediários, evitando a maioria dos problemas causados por falha humana.

Liberdade de design: A impressão 3D em concreto permite a materialização de formas digitais que antes eram inviáveis ou impossíveis de serem executadas sem a manufatura aditiva. A combinação das tecnologias de manufatura aditiva, subtrativa e formativa permite a construção em escala industrial com uma flexibilidade formal sem precedentes. Na produção em série, o custo do produto final depende da repetição em grandes quantidades para compensar o desenvolvimento do projeto. O processo construtivo baseado na fabricação digital possibilita a automatização sem necessidade de padronização, permitindo a "customização em massa".

Redução do impacto ambiental: A impressão 3D em concreto promete reduzir o consumo de energia, água e a poluição ambiental no setor da construção civil. O processo construtivo tradicional gera uma quantidade considerável de resíduos de material, seja por desperdício de diversos materiais ou pelo descarte de formas não reutilizáveis. A construção com impressão 3D em concreto é mais sustentável, permitindo a construção de paredes com materiais que

incluem componentes reciclados e dispensando o uso de formas. Com a manufatura aditiva, o material é depositado apenas onde necessário, resultando em desperdício mínimo.

Otimização do gerenciamento de projetos e obras: Um dos grandes desafios da construção civil é a coordenação eficiente de todos os processos envolvidos. O uso dessa tecnologia promete reduzir os riscos e minimizar os caminhos críticos de uma obra, como erros de interpretação, execução e logística. A tecnologia oferece maior confiabilidade ao projeto, pois muitas tarefas que dependiam de pessoas podem agora ser realizadas por máquinas informatizadas, aumentando a segurança do trabalho. Além disso, pode ser uma ferramenta útil no controle de custos devido à sua maior previsibilidade, evitando a extrapolação do orçamento previsto.

Logística: Na modalidade *in situ*, a impressão 3D em concreto pode ser realizada diretamente no terreno, reduzindo a necessidade de transporte e estocagem de peças.

Redução do déficit habitacional: A questão habitacional não se resolve apenas com a oferta de moradias, mas envolvem várias outras questões. No entanto, a construção de mais moradias em menos tempo, com um padrão de qualidade e custo competitivo, pode se tornar uma ferramenta social valiosa. A tecnologia é especialmente útil em situações em que a mobilização de equipes de trabalho é crítica, como construções em áreas remotas ou reestruturações após catástrofes naturais. Em algumas pesquisas, o concreto utilizado possui fibras que aumentam sua resistência, sendo recomendado para regiões propensas a terremotos. No Brasil, essa tecnologia poderia ser aplicada em programas governamentais de acesso à moradia, como o "Minha Casa, Minha Vida", e em reconstruções emergenciais para vítimas de enchentes e deslizamentos.

2.3.3 Nomenclaturas e Categorias de processos de manufatura aditiva

De acordo com Urhal et al. (2019), o conceito de manufatura aditiva, também conhecido como impressão 3D, refere-se ao processo de criar objetos pela união de materiais com base em modelos 3D, tipicamente por meio da sobreposição de camadas.

Segundo Florêncio (2019), a impressão 3D precisava de padrões que dessem respaldo normativo para que seu uso pudesse ser introduzido na indústria. No sentido de agrupar em categorias as diferentes formas de manufatura aditiva, foi criada uma comissão técnica em 2009

pela ASTM (Sociedade Americana de testes e materiais). Em fevereiro de 2012, a ASTM publicou o resultado da comissão F42, com a norma ISO/ASTM52900-15, ordenando a manufatura aditiva em sete categorias.

A ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018) define a tecnologia de manufatura aditiva (*additive manufacturing*) a partir de um modelo geométrico 3D, sucessivas camadas são depositadas para formarem o material projetado.

De acordo com a ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018) existem sete diferentes categorias de processos de manufatura aditiva, cada processo apresenta características técnicas distintas, sendo: jato de aglutinante (*binder jetting*), deposição por energia direcionada (*direct energy deposition*), extrusão de material (*material extrusion*), jateamento de material (*material jetting*), fusão em leito de pó (*powder bed fusion*), laminação de folha (*sheet lamination*) e fotopolimerização em cuba (*vat photopolymerization*).

Na Tabela 1 são apresentadas as características gerais dos diferentes processos de manufatura aditiva.

Tabela 1: Característica gerais dos diferentes processos de manufatura aditiva

Processo	Característica
Jato de aglutinante	Um agente de ligação de líquido é depositado seletivamente para unir materiais em pó
Deposição por energia direcionada	A energia térmica focada é usada para unir materiais por fusão, à medida que estão sendo depositados.
Extrusão de material	O material é depositado seletivamente por meio de um bico extrusor ou orifício
Jateamento de material	Gotas de material de fabricação são depositados seletivamente
Fusão em leito de pó	A energia térmica se funde seletivamente regiões do leito do pó
Laminação de folha	Folhas de material são ligadas para formar uma peça
Fotopolimerização em cuba	Fotopolímero líquido em uma cuba é curado seletivamente por polimerização ativada por luz

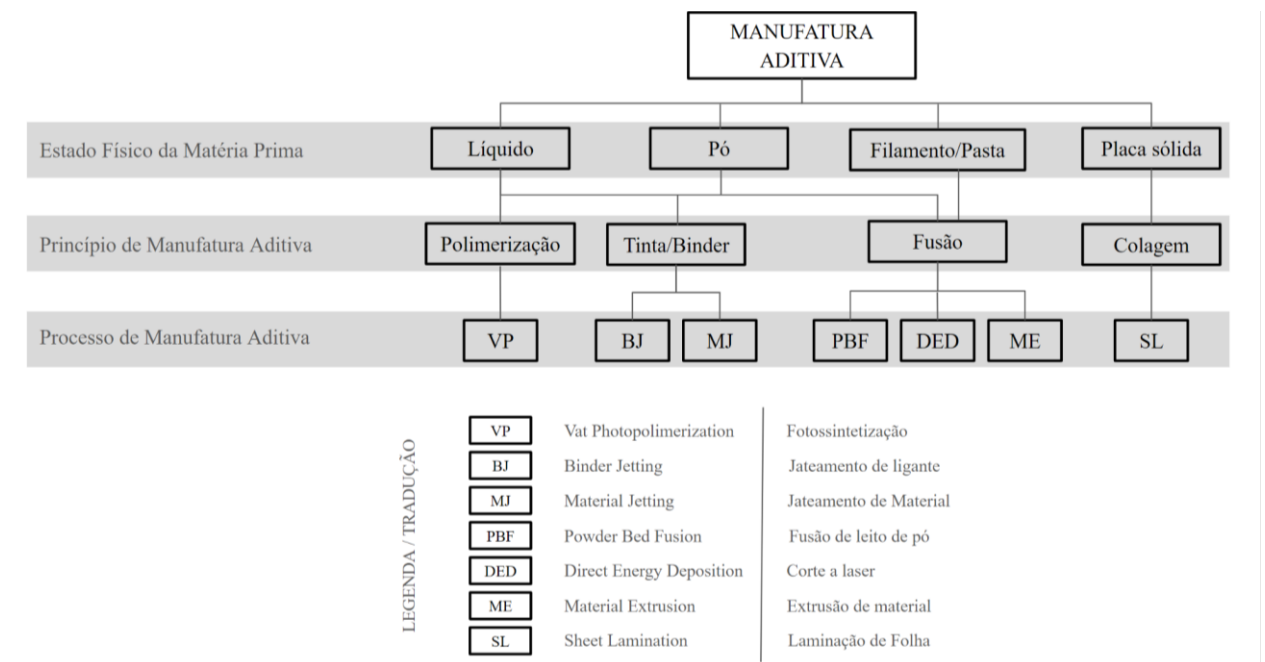
Fonte ISO/ASTM 52900 (ABNT, 2018).

Porém, segundo Pan (2024) a falta de padronização da tecnologia abre margem para a utilização de diferentes nomenclaturas e classificações, que em sua grande maioria não são consensuais na literatura sobre o gênero. Por exemplo, pode-se:

- Levar em consideração o estado da matéria prima: líquido, filamento/pasta, material pulverulento (pó) ou placa sólida (LABONNOTE et al., 2016);
- Considerar o processo empregado: foto-polimerização em cuba (*Vat Photopolymerization*), extrusão (*Material Extrusion*), jateamento de ligante (*Binder Jetting*), jateamento de material (*Material Jetting*), fusão em leito de pó (*Powder Bed Fusion*), corte a laser (*Direct Energy Depositon*), laminação em folhas (*Sheet Lamination*) (ABNT, 2018).
- Levar em consideração o princípio de manufatura aditiva adotado: polimerização, emprego de tinta ou binder, fusão e colagem/fixação (TOFAIL et al., 2018).

Todas estas classificações são válidas, uma vez que abrangem diferentes níveis de detalhamento, conforme verificado na Figura 2 abaixo e em seguida discutidos conforme Florêncio (2019).

Figura 2 - Níveis de classificação de manufatura aditiva



Fonte: PAN, 2024

Vat Photopolimerization (Fotossintetização): Processo de manufatura aditiva no qual um líquido fotossensível em um recipiente é curado por exposição seletiva de raios ultravioleta.

Binder Jetting (Jateamento de ligante): Processo de manufatura aditiva no qual um líquido catalisador é depositado seletivamente para solidificar materiais em partículas muito pequenas, como areia ou pó.

Material Jetting (Jateamento de material): Processo de manufatura aditiva muito semelhante ao utilizado em impressoras baseadas em jato de tinta. Nessa modalidade, o material, geralmente uma resina fotossensível, é depositada de forma seletiva e solidificada por uma luz ultravioleta.

Powder bed fusion (Fusão em leito de pó): Processo de manufatura aditiva que solidifica material contido em um recipiente usando energia direta na forma de raio laser. Confere alta resolução, velocidade de impressão e não necessita de suportes.

Direct Energy Deposition (Deposição de energia direta/corte a laser): Processo de manufatura aditiva onde a energia concentrada é utilizada para derreter o material, geralmente metal, na medida em que ele é depositado.

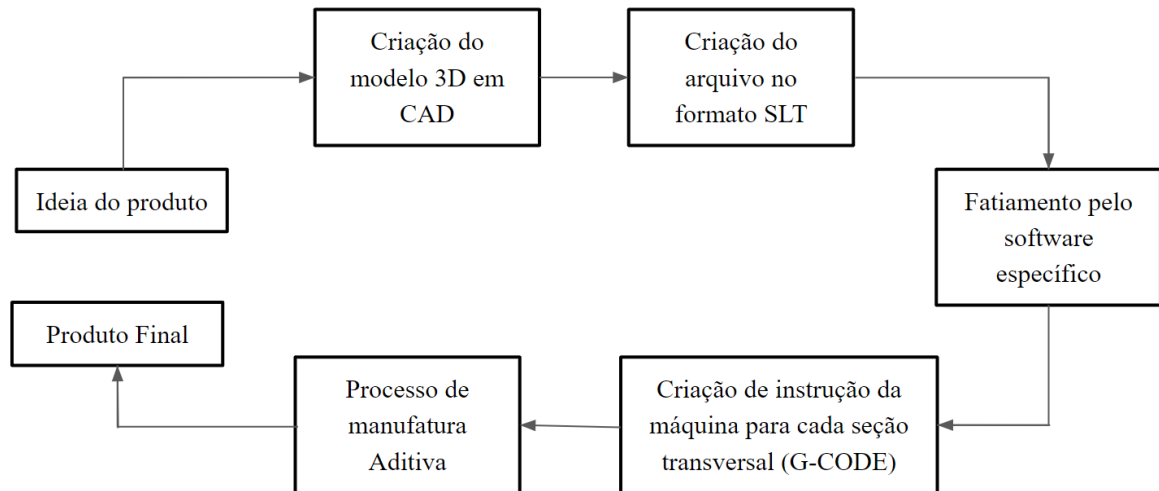
Sheet Lamination (laminação de folhas): Processo de manufatura aditiva e subtrativa no qual lâminas, geralmente de papel são impressas, cortadas e coladas de forma sobreposta, formando o objeto.

Material extrusion (extrusão de material): Processo de manufatura aditiva que deposita material de forma seletiva por meio de um bico com orifício.

2.3.4 Processo de manufatura aditiva por extrusão de material

De maneira geral, conforme descrito por Urhal (2019), o processo da manufatura aditiva abrange seis estágios básicos, conforme ilustrado na Figura 3. De acordo com Roschli (2019), a criação do modelo CAD usualmente é feita utilizando-se os softwares de modelagem tridimensional, como por exemplo, Solidworks, Fusion 360 ou Rhino 3D. No caso da indústria da construção civil, normalmente os softwares utilizados são AutoCAD, Revit, voltados para desenho e fatiamento das peças; e Robodk, utilizado para criação de caminho de máquina para braço robótico.

Figura 3 - Fluxo de informação de processo convencional de manufatura aditiva



Fonte: URHAL (2019)

O usuário pode criar a peça a ser impressa, desde estruturas complexas até as mais simples, em uma única parte ou vários componentes. O arquivo CAD armazena todos os dados referentes ao design da peça, incluindo suas respectivas curvaturas. Posteriormente, exporta-se a peça do software CAD como um arquivo STL, definido como um arquivo de estereolitografia composto por um grupo de faces triangulares conectadas representando a superfície externa de um objeto.

Depois que a peça foi projetada e exportada como uma extensão compatível com manufatura aditiva, o arquivo pode ser carregado em um programa de “fatiamento” para criar o código geométrico (G-Code). Trata-se de um programa independente, que divide o modelo 3D em seções transversais (conhecidas como “fatias”).

Posteriormente ao fatiamento, criam-se sequenciamentos de impressão, que são armazenados como código G (Código Geométrico – G-Code). De acordo com Deans (2020), o código G consiste em uma linguagem de programação CNC responsável pelas instruções relativas à movimentação da máquina, específicas a cada modelo de equipamento. No entanto, outros tipos de código podem também ser utilizados, conforme a solicitação de controle. A Tabela 2 exemplifica a estrutura típica de um código.

Tabela 2 - Descrição do código G (G-code)

N##	G##	X##	Y##	Z##	F##	S##	T##	M##
N	Número da linha							
G	Tipo de movimento							
X	Posição horizontal							
Y	Posição vertical							
Z	Profundidade / Altura							
F	Taxa de alimentação / incremento							
S	Velocidade da ferramenta							
T	Seleção da ferramenta							
M	Funções variadas							
I e J	Coordenadas relativas do centro do arco							
R	Raio do arco							

Fonte: DEANS (2020)

Pode-se tomar como exemplo o seguinte código: G01 X1 Y1 F20 T01 M03 S500 Neste caso, o código indica um movimento de avanço linear (G01) para a posição XY dada (X1 Y1) com taxa de alimentação/incremento de 20 (F20). O equipamento está usando a Ferramenta 01 (T01) na velocidade 500 (S500). No caso a função M determina como a máquina executará determinada ação, variando de acordo com o equipamento utilizado.

Este procedimento, geralmente, é compartilhado pelas diferentes técnicas de manufatura aditiva, sendo que muitas delas são diferenciadas apenas por pequenos detalhes presentes no equipamento, mesmo que o processo de forma geral seja bastante semelhante.

No que se refere à extrusão de concreto, que é o foco deste estudo, é um dos métodos amplamente empregados e bem estabelecidos na tecnologia de impressão 3D na construção. De acordo com a NBR 52900 citada anteriormente, 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 por meio 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).

2.3.4.1 O concreto para impressão e suas limitações

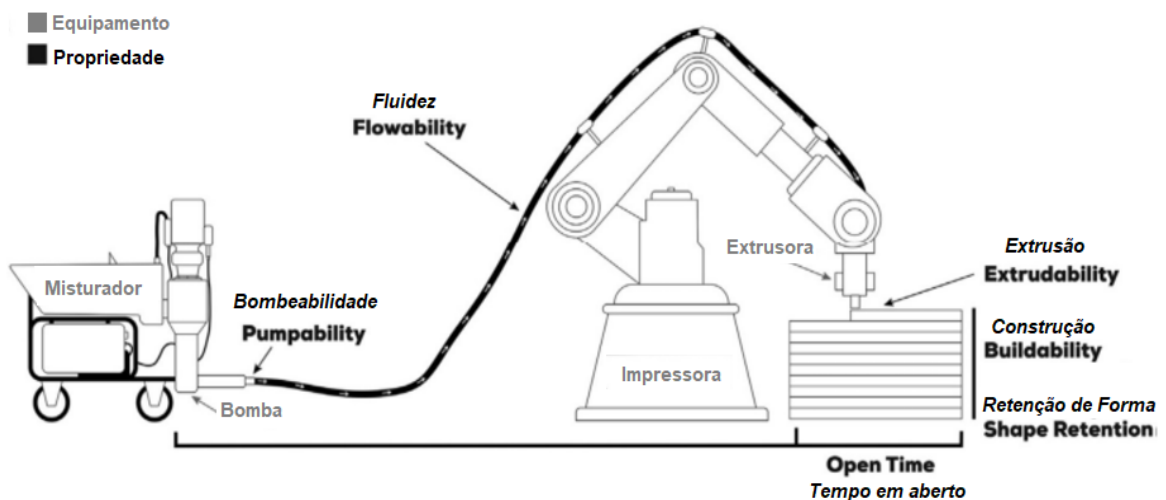
O controle das propriedades da pasta é essencial para o processo de impressão 3D. Se a pasta estiver pouco viscosa, os depósitos sairão como gotas líquidas que se espalham incontrolavelmente.

Com viscosidade e consistência de pasta adequadas para cada situação, cada camada depositada se apresentará de acordo com o tipo de bico utilizado: se for um bico retangular, a camada possuirá uma seção transversal retangular com paredes relativamente retas e tampos planos, com emprego de uma composição mais viscosa, que permite uma melhor estruturação, mais indicada para impressão de peças com geometrias mais simples. Caso seja empregado um bico circular, a geometria do filamento é mais arredondada, sendo mais indicada para impressão com muitas mudanças de direção.

O concreto para impressão deve apresentar alguns requisitos no estado fresco, principalmente relacionados ao seu comportamento reológico. O concreto deve ser fluido o suficiente para passar pela extrusora, porém após a sua passagem, precisa ser firme o bastante para receber novas camadas com uma boa retenção de forma (WANGLER et al., 2016).

Para tornar uma mistura imprimível são necessárias algumas características como, descritas na Figura 4.

Figura 4- Propriedades e equipamentos necessários para manufatura aditiva com extrusão de material



Fonte: Adaptado de LIM, 2012

Trabalhabilidade (*Workability*): é uma característica que facilita a bombagem e a extrusão, mas aumenta a possibilidade de deformação ou colapso da camada;

Fluidez (*Flowability*): representa a capacidade do material de fluir através do sistema de impressão, controlada pela mediação da trabalhabilidade do material com os seguintes testes: tabela de fluxo, fluxo de queda e funil em “V”.

Bombeabilidade (*Pumpability*): A bombeabilidade na impressão 3D em concreto é definida como a capacidade do material se movimentar pela mangueira antes de sua extrusão. A viscosidade do concreto é medida antes de sua extrusão através do teste de slump. Em geral, as misturas de concreto para impressão 3D são mais viscosas para poder suportar o peso das camadas sobrepostas (construtibilidade), sendo desejado o uso de misturas que confirmem o valor de slump próximo, ou igual à zero. Misturas que apresentam baixa viscosidade (muito fluidas) são inadequadas para uso em impressão 3D

Capacidade de Extrusão (*Extrudability*): Diretamente relacionado à trabalhabilidade, é a capacidade das argamassas de serem extrudadas por um bico filamento contínuos, uniforme e estável sem bloquear o sistema. É definida pela capacidade do material em se movimentar através do bico extrusor. Considerando que a impressão 3D em concreto utiliza bicos extrusores para a deposição seletiva é importante que o fluxo de material aconteça, sem interrupções inesperadas. Bolhas de ar, entupimentos e segregação são os principais problemas encontrados no momento da extrusão do concreto impresso e podem ser verificados por inspeção visual.

Capacidade de construção (*Buildability*): Consiste na capacidade do material manter sua forma, resistindo à deformação por achatamento quando submetido ao peso das camadas subsequentes. A construtibilidade na impressão 3D em concreto pode ser medida de acordo com a quantidade de camadas sobrepostas sem que haja deformação significativa das camadas inferiores. Deformações inesperadas podem comprometer a dimensão e a forma do produto final, ou mesmo o colapso do objeto impresso.

Retenção de forma (*Shape Retention*): é a capacidade de manter a geometria das camadas após a extrusão

Tempo em aberto (*Open time*): também denominado de janela de impressão é o tempo que o material deve ter a trabalhabilidade necessária para ser empilhado em camadas sem deformações. É o período no qual é possível utilizar o material antes que ele inicie o processo de endurecimento, sendo possível determinar por meio do ensaio do tempo de pega com aparelho de Vicat.

A inexistência de um padrão de composição resulta em valores de tempo de pega diferentes. O material base deve ser formulado de tal forma que o tempo de pega permita uma boa aderência sem prejudicar o achatamento pela sobreposição das camadas, possibilitando uma forma tão monolítica quanto possível e suficientemente rígida para suportar o próprio peso (LABONNOTE, 2016).

Além dessas propriedades citadas, a aderência entre camadas é uma característica bastante estudada na manufatura aditiva em concreto, uma vez que ela afeta diretamente a integridade estrutural da peça. A adesão entre camadas é a capacidade que o material tem de se relacionar com as camadas subsequentes. Na impressão 3D em concreto, cada camada é única, apresentando variações com o decorrer do tempo. A aderência fraca (juntas frias) ou mesmo o descolamento de camadas é um fenômeno observado com certa frequência.

Para Kothman e Faber (2016), quando a impressão 3D de concreto atingir a maturidade tecnológica, adicionará possibilidades únicas e inéditas, revolucionando o mercado da construção como um todo, com: construções mais rápidas e baratas, liberdade geométricas que atendem a individualização e a funcionalidade, além de proporcionar uma maior sustentabilidade na construção.

Por outro lado, a impressão 3D de concreto necessita de um longo período para o seu desenvolvimento e maturidade na indústria. Na fase atual, grande parte das pesquisas existentes são voltadas à otimização das propriedades no estado fresco, já que o concreto tradicionalmente utilizado não atende aos requisitos reológicos para uso nas impressoras (SOUZA et al., 2020).

A substituição dos agregados graúdos por materiais finos, como: areia, cinza volante e sílica ativa, é uma das alternativas para alcançar a habilidade de imprimir (*printability*) do concreto. No entanto, a ausência de agregado graúdo nas misturas, provoca o aumento da retração e das fissurações. Uma das alternativas encontradas na bibliografia é a utilização de fibras e aditivos (YIN, H. et al., 2018). Para Zareiyan e Khoshnevis (2017), a formação de juntas frias durante

o processo de impressão é um dos maiores desafios para a aplicação prática desta tecnologia. Nessas regiões podem estar localizadas falhas, que comprometem o desempenho mecânico da peça. Uma outra limitação técnica da manufatura aditiva de concreto é na incorporação de reforços de aço na estrutura.

Alguns trabalhos exploraram a utilização de fibras para a substituição total ou parcial de telas e barras metálicas nas estruturas de concreto. Na impressão 3D, algumas publicações investigaram a utilização de fibras para suprir as demandas do material em seu estado endurecido (PANDA; PAUL; TAN, 2017; NEMATOLLAHI et al., 2018a, 2018b; ARUNOTHAYAN et al., 2020; SCHULTE et al., 2021).

Diante do estado atual do desenvolvimento do concreto de impressão 3D, as maiores dificuldades encontradas em sua produção são no estado fresco. Os concretos utilizados nesta aplicação devem ser bombeados e extrudados sem segregação. Após a sua passagem pelo bico da extrusora devem manter a sua coesão e apresentar estabilidade de forma (RUBIN; HASSE; REPETTE, 2021). Uma das possíveis alternativas para melhoria de seu desempenho no estado fresco e endurecido é com a utilização de fibras.

2.3.4.2 Maquinários existentes

A impressão 3D de peças grandes tornou-se viável graças à implementação e ao uso de impressoras de grande formato. O sucesso dessa técnica é atribuído à integração da automação de ferramentas com a robótica, a mecânica e a computação, que funcionam como mecanismos de controle do sistema.

Existem basicamente quatro tipos de equipamento de extrusão de concreto, com pequenas variações dependendo do fabricante: pórtico movimentado sobre trilhos, braço robótico multiaxial, impressora tipo delta e a Impressora Móvel KARLOS Putzmeister (PAN, 2024).

Modelo de pórtico movimentado sobre trilhos

O modelo de pórtico, mostrado na Figura 5, representa uma expansão da fabricação aditiva para a construção aditiva em suma, uma impressora 3D gigante. O bico de extrusão do concreto realiza movimentos de translação em qualquer direção definido pelos eixos X, Y e Z nas coordenadas cartesianas.

As soluções de pórtico foram desenvolvidas pela primeira vez para a extrusão em concreto em 2001 e, posteriormente, Khoshnevis, da Universidade do Sul da Califórnia, nos EUA, depositou uma patente combinando este tipo de impressora com um material. Esse processo foi chamado “*Contour Crafting*” (LABONNOTE, 2016). A estrutura de pórtico possui algumas limitações, tais como o transporte, a instalação e as dimensões necessárias para imprimir grandes peças.

Figura 5- Impressora 3D de concreto de pórtico



Fonte: EL Sayegh et al, (2020).

Para produzir um componente em larga escala, um sistema de pórtico deve ser maior do que o componente que está sendo construído, gerando várias dificuldades de transporte e instalação. Outro problema do sistema de pórtico é a deposição ortogonal, que só permite a extrusão de material perpendicular à superfície de construção, limitando a curvatura para o plano horizontal (CAMACHO, 2018).

Outra limitação é com relação à fabricação de estruturas de canto afiado. Para resolver parte desse problema, um grau extra liberdade é adicionado, fazendo com que a cabeça da impressora gire em torno do eixo Z. Assim, quando a cabeça mudar de direção de um movimento retilíneo, o bico gira, evitando que o filamento fique torcido. Além desse movimento da cabeça da impressora, é necessário um bom sistema de controle, para garantir a geração de trajetórias suaves quando o robô se aproxima de configurações singulares (EL-SAYEGH, 2020).

Braço robótico multiaxial

Outra impressora 3D de concreto muito utilizada é a de sistemas de robôs articulados, que consiste em um braço robótico, como mostra a Figura 6. Requerem menos espaço do que os sistemas de pórtico e podem ser montados em uma plataforma transportável, facilitando a montagem nos locais de construção. No entanto, elas possuem uma limitação de espaço de trabalho, em comparação com os pórticos, pois seu alcance é limitado pelos altos momentos gerados na base quando o braço do robô atinge sua extensão máxima. Esse sistema é chamado de robô cilíndrico, em que a primeira articulação corresponde à translação vertical, a segunda articulação corresponde à rotação e a terceira corresponde a uma translação telescópica (EL-SAYEGH, 2020).

Figura 6- Impressão 3D de concreto por um braço robótico fixo



Fonte: EL Sayegh et al, (2020).

Os braços robóticos fazem caminhos circulares com maior facilidade, porém, os cantos afiados continuam sendo uma limitação. Para estruturas mais complexas, mais de três graus de

liberdade são necessários. Mas para uma impressão camada por camada, quatro graus de liberdade já são suficientes, em que o quarto grau se refere à rotação da cabeça em torno do eixo vertical (EL-SAYEGH, 2020). Além da extrusão de materiais, os braços robóticos podem executar tarefas auxiliares relacionadas à construção, como pintura, atividades de acabamento e montagens (LABONNOTE, 2016).

Quando o braço robótico é montado em uma estrutura móvel, a escala da impressão pode ser aumentada consideravelmente, sem precisar de uma impressora 3D de grandes dimensões. Quando se utiliza um grupo de robôs móveis, a escala e velocidade de impressão podem aumentar ainda mais.

Os *Minibuilders*, conforme apresenta a Figura 7, apresentam uma abordagem alternativa para impressão 3D em concreto, com a utilização de três robôs. O primeiro imprime a base, seguindo um caminho marcado. O segundo imprime camadas adicionais de concreto e o terceiro usa ventosas e ar pressurizado para imprimir verticalmente, reforçando a estrutura previamente impressa (ZHANG, 2018).

Figura 7- Impressão 3D de concreto por um grupo de robôs móveis



Fonte: Zhang et al, (2018).

Impressoras 3D do tipo Delta

A fim de se aumentar a área de impressão, impressoras no modelo delta fornecem novas soluções para a manufatura aditiva para a construção civil. As impressoras 3D do tipo Delta possuem três atuadores lineares posicionados verticalmente ao redor de um círculo. Diferente das impressoras 3D de design cartesiano, onde os atuadores lineares estão alinhados com cada um dos três eixos ortogonais, as impressoras Delta utilizam o movimento coordenado desses atuadores para deslocar o bico extrusor para qualquer ponto dentro do volume de impressão (BELL, 2015).

As impressoras 3D do tipo Delta têm atraído crescente interesse dos fabricantes de impressoras de baixo custo devido às suas características operacionais, como a alta velocidade de funcionamento e a precisão no posicionamento. Além disso, a capacidade dessas impressoras de alcançar grandes alturas de impressão tem despertado a atenção de áreas como a engenharia civil e a arquitetura. A Figura 8 ilustra um exemplo desse tipo de impressora.

Figura 8- Impressora tipo delta



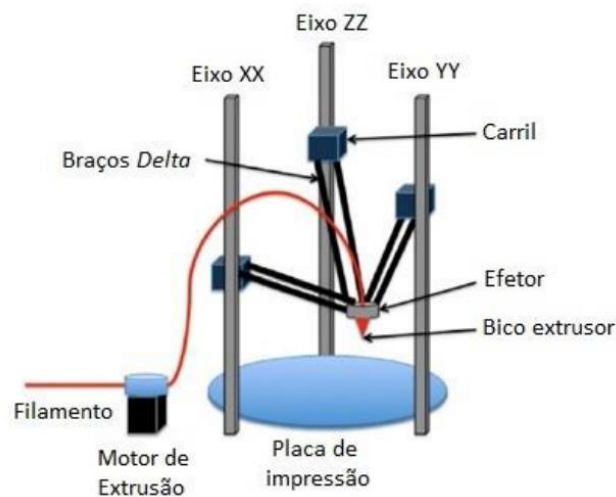
Fonte: C. Bell, 2015.

Quando comparados com outros sistemas robóticos de construção, os robôs de cabos são mais baratos e fáceis de transportar, montar e desmontar no local. Além disso, a configuração da estrutura baseada em cabos permite uma maior área de impressão. Ao contrário dos robôs voadores, eles podem transportar cargas maiores e trabalhar continuamente por meio do fornecimento constante de energia, evitando o uso de baterias. Apesar dessas vantagens, a

quantidade e movimentos dos cabos podem causar interferência no espaço de trabalho e sua força na direção descendente é limitada. Outra dificuldade é o controle da precisão devido às forças de tensão e elasticidade dos cabos (SOUZA, 2016).

Segundo Bell (2015), o movimento de translação é realizado verticalmente ao longo de três trajetórias, permitindo aumentar facilmente a altura de trabalho ao estender o curso dessas torres. Estas torres verticais são dispostas em uma configuração triangular. Para que o efetor se mova no plano XY, é necessária a sincronização dos movimentos. Para a translação vertical do efetor, os movimentos devem ser iguais. Para melhor compreensão do movimento de uma impressora deste tipo, a disposição dos componentes pode ser observada na Figura 9.

Figura 9- Anatomia de uma impressora 3D do tipo Delta



Fonte: C. Bell, 2015.

Para garantir uma impressão 3D multicor em condições ideais, é fundamental calibrar a impressora corretamente, posicionar adequadamente os suportes dos rolos de filamento e determinar a localização precisa dos alimentadores. Além desses aspectos, é necessário analisar os diferentes softwares disponíveis para esse tipo de impressão e realizar um estudo detalhado do extrusor utilizado. (REGADAS, 2017).

Impressora Móvel KARLOS Putzmeister

A Putzmeister, uma empresa renomada no segmento de bombeamento de concreto, desenvolveu tecnologias relacionadas à impressão 3D de concreto, incluindo soluções móveis para impressão 3D. A **KARLOS** é uma dessas soluções, voltada para facilitar o uso da impressão 3D na construção civil, particularmente em aplicações de concreto.

O diferencial desse tipo de dispositivo está no fato de que os componentes da impressora como bomba, braço robótico, extrusor, estão todos acoplados em um veículo de transporte. O design móvel dessas impressoras facilita o transporte para diferentes canteiros de obra.

Como algumas das principais características, pode-se citar:

- Aplicações de impressão: Paredes sólidas verticais
- Largura/altura de impressão até 30 cm/ até 6 m
- Tempo de montagem e desmontagem aproximadamente 60 min
- Material de impressão com tamanho máximo de partícula de 8 mm
- Velocidade de impressão 10 cm/s
- Alcance de impressão 26 m

Figura 10- Impressora móvel KARLOS Putzmeister



Fonte: PUTZMEISTER, 2024

3. APLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

No **terceiro capítulo** serão apresentadas aplicações na prática da tecnologia de manufatura aditiva por extrusão de material com enfoque nas empresas *IconBuild* e COBOD, consideradas nas bibliografias as empresas com maior estágio de evolução e de maior relevância no setor no momento.

3.1 Icon Build

A ICON BUILD é uma empresa inovadora que se destaca pela utilização de tecnologia de impressão 3D na construção de habitações e outras estruturas. Fundada em 2017 e sediada em Austin, Texas, a ICON tem como missão enfrentar a crise global de moradia por meio de métodos de construção mais eficientes, sustentáveis e acessíveis. A empresa emprega robótica avançada e softwares de ponta para produzir edificações de alta qualidade de forma rápida e econômica, visando não apenas a redução de custos, mas também a minimização do impacto ambiental associado aos processos tradicionais de construção.

A ICON BUILD tem sido pioneira no desenvolvimento de tecnologias que permitem a impressão de componentes estruturais diretamente no local da construção. Essa abordagem não só acelera o tempo de construção, mas também melhora a precisão e a durabilidade das estruturas. Além disso, a ICON é conhecida por sua capacidade de criar moradias personalizadas que atendem às necessidades específicas de diferentes comunidades, especialmente em áreas afetadas por desastres naturais ou com déficit habitacional significativo.

Os projetos realizados pela ICON BUILD incluem a construção de casas sustentáveis e acessíveis, utilizando uma mistura própria de concreto que é extrusada camada por camada para formar as paredes e outras partes estruturais das edificações. Essa técnica inovadora permite a criação de formas arquitetônicas complexas e eficientes em termos de energia, contribuindo para um futuro mais verde e sustentável na construção civil.

O conjunto de robótica, software e materiais da ICON é constituído por duas impressoras principais, sendo uma no modelo de braço robótico e outra no modelo de pórtico, nomeadas respectivamente como ‘Phoenix’ e ‘Vulcan’, ambas utilizam o método de extrusão. No que se refere a material, a ICON desenvolveu o Carbon X, sendo este um concreto com baixo teor de

carbono. Além disso, a empresa conta com um catálogo digital de arquitetura e utiliza um sistema de IA para projetar e construir casas.

Phoenix: O novo sistema robótico de construção de vários andares da ICON demonstra a capacidade de imprimir todo o invólucro de um edifício, incluindo fundações e estruturas de telhado. Este sistema robótico avançado promete aumentar a velocidade e o tamanho das construções, ao mesmo tempo em que diminui o tempo de configuração e o número de operadores necessários. Como resultado, espera-se que os custos de impressão da ICON sejam reduzidos pela metade.

A ICON está agora aceitando pedidos para projetos utilizando o sistema Phoenix, com preços a partir de aproximadamente US\$ 270 por metro quadrado para sistemas de parede, ou US\$ 860 por metro quadrado incluindo fundação e cobertura. Este custo de construção é inferior aos dados mais recentes disponíveis publicamente para a construção convencional de sistemas de paredes. Estima-se que o custo do sistema de parede represente uma economia de até US\$ 25.000 para uma casa média americana, em comparação com os métodos convencionais de construção.

O primeiro protótipo de impressora do Phoenix (Figura 10) completou uma estrutura impressa de demonstração arquitetônica de 8,23 metros de altura, que encontra-se em exibição em Austin, Texas.

Figura 11 -Impressora Phoenix da Icon Build



Fonte: ICON BUILD (2024)

Vulcan: é uma impressora 3D de construção em grande escala em modelo pórtico que imprime casas inteiras no local. A impressora foi projetada para ser transportada rapidamente para locais de construção e, em seguida, movida rapidamente de um local para outro. Na Figura 11 é possível verificar que a Vulcan imprime diretamente no chão ou em uma laje vazada.

Figura 12- Impressora Vulcan da Icon build



Fonte: ICON BUILD (2024)

CarbonX: é um material cimentício, demonstrado na Figura 12, feito de materiais provenientes do sul do Texas que se unem para produzir um produto totalmente novo no mercado. Trata-se de uma fórmula própria de concreto com baixo teor de carbono criada pela equipe de ciência de materiais da ICON para ser altamente imprimível e incrivelmente forte. O CarbonX passou por testes e desenvolvimento rigorosos, resultando um material de construção extremamente durável. O CarbonX alcançou uma redução de carbono de 24%, quantificável em 85 kgCO₂e/CY, e possui uma resistência à compressão de 2.500 - 3.500 psi, ou seja 17,2 - 24,1 MPa.

Figura 13 - Extrusão do CarbonX



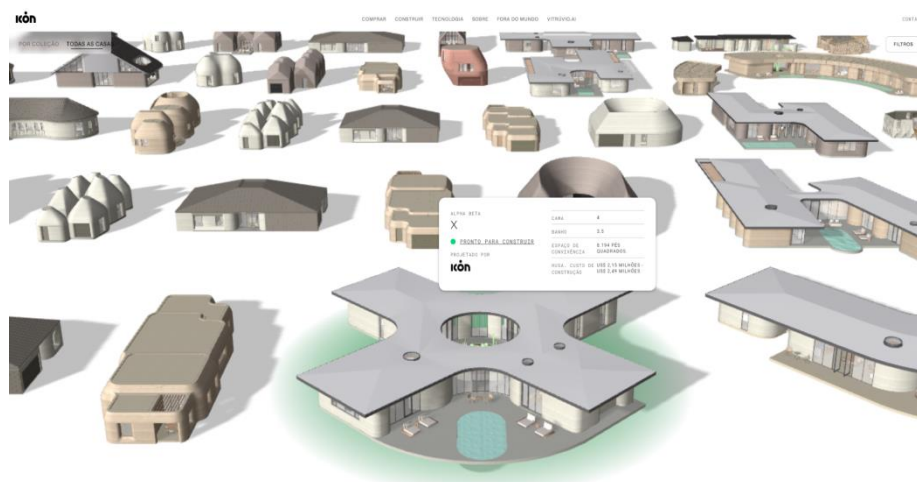
Fonte: ICON BUILD (2024)

Quando combinada com o sistema de parede e métodos de construção robóticos da ICON, a fórmula CarbonX da ICON resulta um sistema de construção residencial com menor teor de carbono, pronto para ser usado em escala. Um artigo de coautoria com o MIT Concrete Sustainability Hub, “Reduzindo as emissões de carbono no ambiente construído: um estudo de caso em casas impressas em 3D” (publicado em 12 de março de 2024), apresenta um estudo de caso de casas impressas em 3D empregando CarbonX. Os resultados da avaliação do ciclo de vida apresentados no artigo mostram que os impactos incorporados e operacionais das casas impressas em 3D são inferiores aos da construção com estrutura rígida.

A ICON também anunciou que disponibilizará seu material para outros projetos e clientes, não apenas para seus próprios projetos impressos em 3D. As formulações futuras do CarbonX já estão em desenvolvimento para reduzir ainda mais a pegada de carbono e deverão ser anunciadas no próximo ano.

CODEX: O catálogo digital de arquitetura doméstica pronta para impressão da ICON, como mostra a Figura 13, apresenta mais de 60 designs em cinco coleções: Texas moderno, resistente ao fogo, resistente a tempestades, acessível e vanguardista. O objetivo do CODEX é disponibilizar arquitetura residencial de alto design e alto desempenho em todas as faixas de preço. O CODEX permite que construtores, desenvolvedores e compradores de casas construam com ICON de forma rápida e econômica, usando arquitetura de classe mundial.

Figura 14 - Catálogo CODEX da ICON



fonte: ICON BUILD (2024)

Outro objetivo da ICON é que o CODEX seja o catálogo digital mais abrangente de projetos de casas edificáveis do mundo. Ele capacita os clientes da ICON a selecionar pelo site projetos preferidos como ponto de partida para suas comunidades e desenvolvimentos planejados. A ICON continuará a apresentar novas coleções e fará parceria e compensará arquitetos de todo o mundo para apresentarem seus projetos. Três das coleções CODEX disponíveis hoje foram projetadas pelo BIG-Bjarke Ingels Group. Os arquitetos podem enviar seus projetos e os desenvolvedores podem explorar as coleções e iniciar projetos com o ICON.

Vitruvius: Um sistema de IA para projetar e construir casas. O objetivo final do Vitruvius é obter informações humanas e de projeto e produzir arquitetura, planos, projetos prontos para licença, orçamentos e cronogramas robustos. Lançado hoje com uma versão beta aberta, o Vitruvius ajudará qualquer pessoa a projetar casas e gerar plantas baixas, renderizações internas e externas em minutos, com base em seus próprios desejos, orçamentos e feedback.

Até ao final deste ano, Vitruvius irá progredir por meio de projetos esquemáticos e no ano seguinte a ICON acredita que o seu arquiteto de IA será capaz de produzir documentos de construção completos, bem como projetos, orçamentos e cronogramas prontos para licença. O que realmente torna o Vitruvius único é a combinação de conhecimento em design e construção. Esse conhecimento é o que permite a Vitruvius produzir projetos que podem realmente ser construídos.

A empresa em questão já alcançou êxito em várias empreitadas, destacando-se como um exemplo notável. Dentre os casos, podem-se citar a House Zero, a coleção Genesis no Wolf Ranch e o El Cosmico.

3.1.1 House Zero

Em 2022, a ICON apresentou "House Zero" (CUTIERU, 2022), um projeto 3D impresso em colaboração com Lake|Flato Architects (Figura 14). Este é o primeiro da série "Exploration Series" da ICON, destacando as possibilidades arquitetônicas da construção aditiva.

A House Zero é uma residência com mais de 185,8 metros quadrados, contendo 3 quartos e 2 banheiros, além de uma unidade residencial acessória de 32,5 metros quadrados, com 1 quarto e 1 banheiro. Esta casa apresenta um sistema de parede resiliente impresso em 3D pela ICON, o qual substitui um método de construção convencional que tipicamente envolve múltiplas etapas, resultando em economia de tempo, redução de desperdício e custos.

House Zero, apresentada na Figura 14, foi projetada para mostrar o potencial da impressão 3D na construção residencial, destacando como essa tecnologia pode criar casas não apenas funcionais, mas também esteticamente agradáveis e sustentáveis. O projeto busca estabelecer um novo padrão para construções residenciais, integrando design moderno e alta eficiência energética.

Figura 15 - House Zero (a) e seus acabamentos internos (b) e (c)



Fonte: ICON BUILD (2024)

House Zero foi construída usando a impressora Vulcan da ICON. A impressora Vulcan é capaz de criar paredes e outras estruturas diretamente no local da construção com alta precisão e rapidez. Essa construção serviu como um protótipo e uma vitrine das capacidades da ICON BUILD em transformar o setor de construção residencial. Na Figura 15, é possível identificar as etapas construtivas da construção. Este projeto mostra como a impressão 3D pode ser uma solução viável e superior para a construção de moradias, abordando desafios como custos elevados, tempos longos de construção e impacto ambiental.

Figura 16 - Etapas construtivas da fundação (a) e da elevação das paredes (b)



Fonte: ICON BUILD (2024)

3.1.2 A coleção Genesis no Wolf Ranch

Em 2022, a ICON revelou a construção de uma comunidade composta por 100 residências impressas em 3D, projetada em colaboração com o BIG - Bjarke Ingels Group e desenvolvida pela Lennar. Situada ao norte de Austin, na cidade de Georgetown, "The Genesis Collection at Wolf Ranch" será a primeira e maior propriedade residencial do mundo erguida por uma frota de robôs que utilizam técnicas de construção aditiva, apresentada na Figura 16.

Unindo as capacidades digitais da impressão 3D com características sustentáveis a um custo acessível, o projeto tem como objetivo enfrentar a crise habitacional em Austin, uma das cidades de crescimento mais rápido nos EUA.

Figura 17 - Processo de impressão (a) e acabamentos da construção (b) e (c)

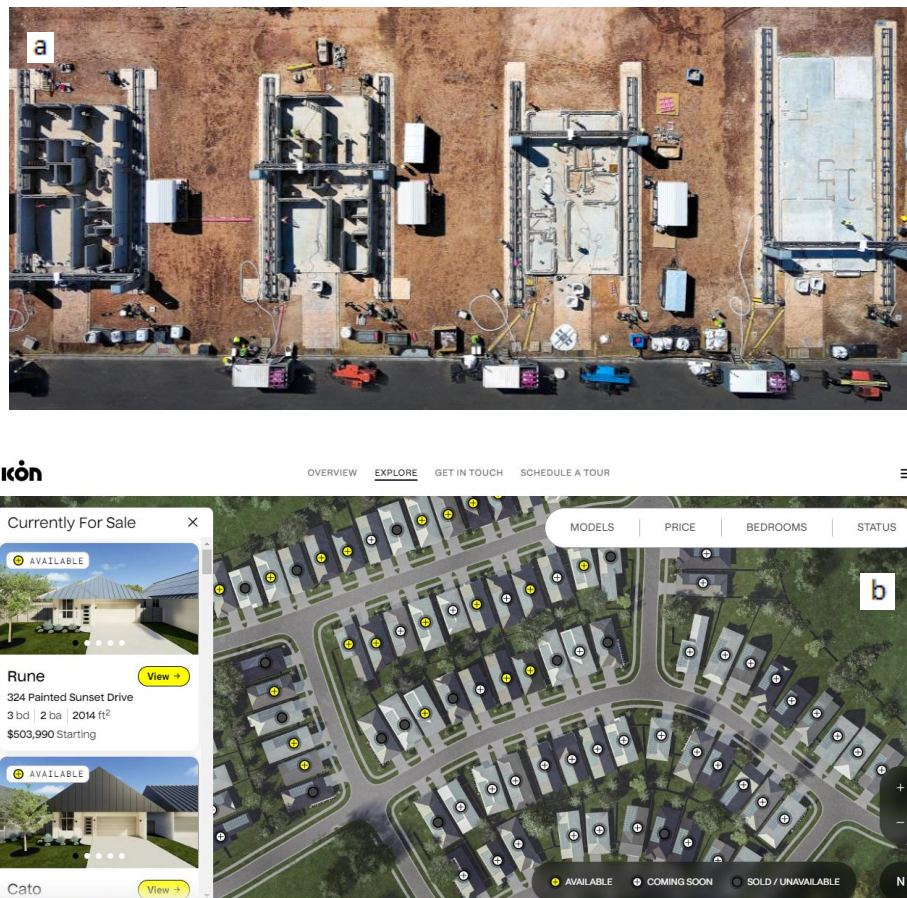


Fonte: ICON BUILD (2024)

Baseando-se em protótipos anteriores, o tempo necessário para construir a estrutura de uma casa de 90 a 200 metros quadrados é de aproximadamente 5 a 7 dias, uma redução significativa em comparação com métodos tradicionais, como o wood frame, que pode levar até 16 semanas para a mesma área.

O estilo contemporâneo rancho texano é caracterizado por espaços generosos de pé-direito duplo e uma paleta de materiais composta por elementos naturais e de alta qualidade. As paredes impressas em 3D proporcionarão desempenho energético superior e serviços integrados, sendo cobertas com telhados metálicos e fotovoltaicos, aumentando a sustentabilidade e a resiliência do complexo. A comunidade oferece oito plantas baixas, variando de 150 a 200 metros quadrados, com 24 elevações distintas e está em construção. No site da empresa demonstrado na Figura 17, é possível verificar as casas que já foram vendidas, as que já estão concluídas e disponíveis para venda, e os lotes ainda sem construção.

Figura 18 - Andamento da construção (a) e vendas das casas impressas do condomínio (b)



Fonte: ICON BUILD (2024)

3.1.3 Projetos futuros - El Cosmico

Em 2026, a Icon planeja inaugurar o primeiro hotel do mundo totalmente construído por meio de impressão 3D. O projeto, desenvolvido pelo escritório de arquitetura Bjarke Ingels Group, será liderado pela empresária Liz Lambert, conhecida por gerenciar hotéis icônicos nos Estados Unidos. Uma área de 250 mil metros quadrados do deserto de Marfa, no Texas, será dedicada à expansão do já existente camping-hotel El Cosmico. O novo empreendimento, mostrado nas Figuras 18 e 19 a seguir, incluirá suítes em formato de domo, uma piscina circular com borda infinita, balneário e cozinha ao ar livre, além de áreas de convivência e espaços para artes e eventos.

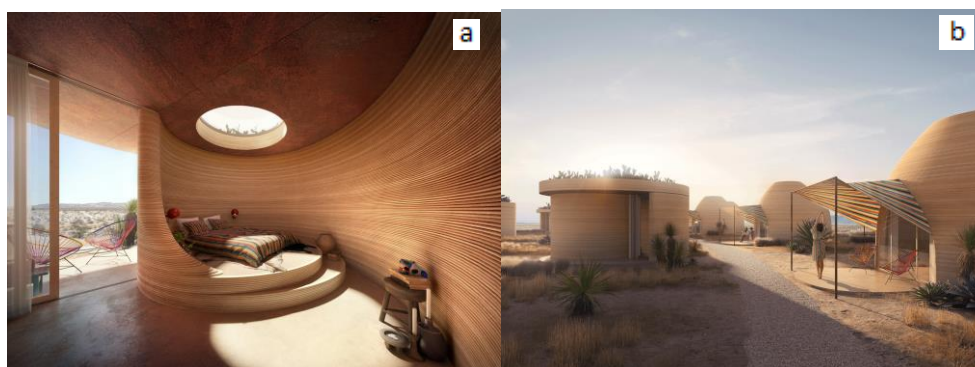
Figura 19 - Hotel El Cosmico



Fonte: ICON BUILD (2024)

Além do setor de hospedagem, a propriedade disponibilizará residências com configurações de dois, três ou quatro dormitórios, que poderão ser compradas para uso privado. As máquinas "Vulcan" serão encarregadas de realizar o projeto e garantir que todas as especificações sejam atendidas. Embora as obras ainda não tenham começado, uma vez finalizado, o El Cosmico se tornará o primeiro hotel do mundo construído com essa nova tecnologia.

Figura 20 - Projeto das edificações internamente (a) e externamente(b)



Fonte:ICON BUILD (2024)

3.2 Cobod

A empresa dinamarquesa COBOD se especializa em fornecer soluções de impressão 3D para o setor da construção civil, tendo comercializado mais de 50 impressoras globalmente. A missão da COBOD é revolucionar a construção por meio de robôs multifuncionais que utilizam tecnologia de impressão 3D, com a visão de automatizar pelo menos 50% dos processos de construção nos canteiros de obras. Na Figura 20, é demonstrada a impressora no modelo pórtico fornecido pela COBOD.

Em 2017, as impressoras 3D da COBOD foram responsáveis pela construção do primeiro edifício impresso em 3D na Europa. Subsequentemente, elas construíram os primeiros edifícios de 2 e 3 andares na Europa (Bélgica e Alemanha), América do Norte (EUA e Canadá) e Índia. Além disso, a primeira vila impressa em 3D em Dubai e vários edifícios na África foram realizados com impressoras da COBOD, assim como as primeiras bases de turbinas eólicas impressas em 3D.

A COBOD adota uma estratégia de materiais de código aberto, colaborando com clientes, instituições acadêmicas e fornecedores ao redor do mundo. A empresa é de propriedade privada, com acionistas principais como General Electric, CEMEX, Holcim e PERI. Seus parceiros incluem Dar Al Arkan (Arábia Saudita), L&T Construction (Índia), JGC (Japão), Siam Cement (Tailândia) e Orascom (Egito).

Figura 21 - Impressora modelo pórtico fornecido pela COBOD



Fonte: COBOD 2024

A COBOD oferece uma solução completa, sendo seu principal produto uma impressora 3D para construção, suportada pelo software COBOD Slice, que prepara os modelos 3D projetados e os converte em arquivos imprimíveis. O sistema inclui um silo para armazenar cimento seco, uma central de mistura do material e uma bomba que entrega o concreto misturado à impressora.

Diferentemente da Icon, que se concentra em fornecer construções feitas pelo método de impressão 3D, a COBOD vende impressoras juntamente com todo o sistema de entrega de material. Além disso, a empresa oferece diversos serviços adicionais, como instalação, treinamento e manutenção das impressoras; certificações e documentação; financiamento; portal de atendimento ao cliente; e acesso a especialistas em materiais e arquitetos de renome mundial.

3.2.1 Dar Al Arkan

A Dar Al Arkan é uma renomada empresa de incorporação imobiliária localizada no Reino da Arábia Saudita (KSA). Especializando-se no desenvolvimento de comunidades residenciais planejadas, a empresa oferece terrenos desenvolvidos, apartamentos, vilas e imóveis de uso misto, integrados em grandes comunidades residenciais que incluem edifícios comerciais e de varejo.

Figura 22 - Construção *impressa* pela Dar Al Arkan



Fonte: COBOD (2022)

Um dos projetos notáveis da Dar Al Arkan envolvendo impressão 3D (Figuras 21 e 22) foi realizado utilizando materiais locais e a solução D.fab, desenvolvida em parceria com a Cemex e a COBOD. Essa solução inovadora permite que os clientes da COBOD obtenham 99% dos materiais de concreto localmente, com apenas 1% necessário de um local centralizado. O custo total de materiais impressos para esse projeto foi inferior a 10.000 euros.

Situado em um terreno de 12.000.000 m², o projeto Dar Al Arkan consiste em uma residência de três andares com uma área total de 345 m² e uma altura de 9,9 metros. Este edifício foi projetado para atender às necessidades contemporâneas. O primeiro andar, com uma área de 130 m², inclui um salão com diversas áreas de convivência, uma cozinha e dois banheiros. O segundo andar, abrangendo 140 m², acomoda três quartos, incluindo uma suíte, dois banheiros, uma sala de estar e uma varanda.

O terceiro andar, de dimensões menores, constitui um anexo no telhado. Neste espaço, encontra-se um quarto destinado aos prestadores de serviço, um banheiro, um salão multiuso e uma lavanderia.

Figura 23 - Construção impressa pela Dar Al Arkan



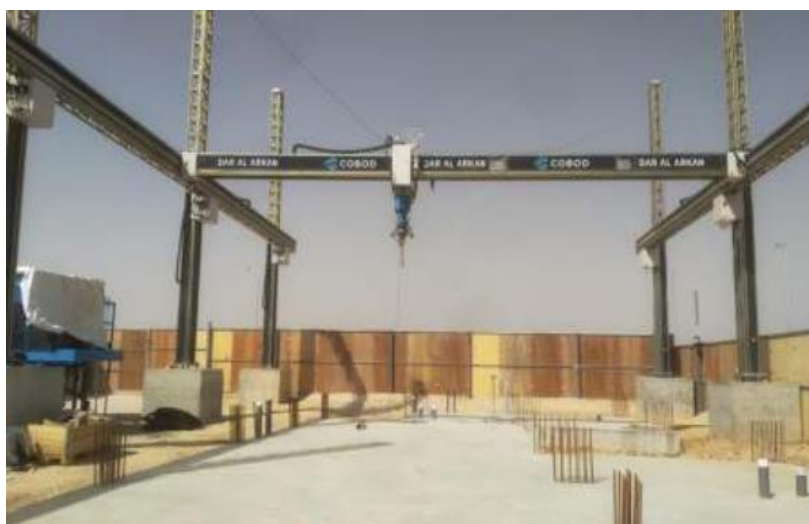
Fonte: COBOD 2022

O processo de construção foi realizado entre agosto e setembro de 2022, em um deserto quente onde as temperaturas frequentemente excedem 40 graus Celsius. A utilização da manufatura aditiva eliminou a necessidade de tendas de proteção, uma prática comum em canteiros de obras tradicionais (COBOD, 2022).

Uma das características mais notáveis da tecnologia de impressão 3D é a flexibilidade de design. Essa flexibilidade permitiu que a Dar Al Arkan personalize facilmente acabamentos e estilos, proporcionando aos futuros clientes uma experiência de personalização única. Com essa capacidade, a empresa está estabelecendo um novo padrão de excelência no setor imobiliário, projetando residências sob medida para atender às preferências 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 sublinhou 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, como visto na Figura 23, foi instalada sobre blocos de concreto fabricados manualmente, assim como a laje do piso, que também seguiu métodos tradicionais de construção (COBOD, 2022).

Figura 24 - Bases do maquinário



Fonte: COBOD, 2022

4. AÇÕES NO BRASIL

4.1 Inova House 3D e 3D Home Construction

A primeira edificação impressa em 3D no Brasil, conforme exposta na Figura 24, foi realizada em Natal, Rio Grande do Norte, no ano de 2020, pelas empresas InovaHouse3D e 3DHomeConstruction, idealizada por estudantes de engenharia da cidade de Brasília, com recursos limitados.

Figura 25 - Primeiro casa impressa em 3D no Brasil.



Fonte: Martinelli (2020).

Com uma área total de 66,32 m² e pé direito de 2,40m, a casa na figura 24, 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, como visto na Figura 25, com um tempo total estimado de 48 horas, considerando o cenário ideal de funcionamento sem interrupções e imprevistos.

Figura 26 - Planta Baixa da edificação



Fonte: Laje (2020)

O grau de confiabilidade do composto cimentício para alimentar a impressora 3D foi conseguido após seis meses do início do projeto. Para alcançar a especificação ideal, os pesquisadores contaram com o apoio da equipe de pós-graduação em engenharia de materiais da UFRN.

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.

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.

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.

Além desse caso, existe um projeto em andamento da Inovahouse3d que iniciou em 2022. A ideia é fazer um complexo habitacional de interesse social que vai beneficiar 20 famílias. A empresa, inclusive, já apresentou a proposta de arquitetura, mostrado nas Figuras 26 e 27, e o projeto foi aprovado, podendo seguir para as demais esferas no processo de construção. A figura abaixo mostra uma maquete em 3D da casa do projeto Habita-se Maceió.

Figura 27 - Modelo 3D da casa do projeto Habita-se Maceió



Fonte: Inovahouse3d, 2022

Esse projeto, que é uma parceria entre a empresa, a Cruz Vermelha e a prefeitura de Maceió, contarão com área de lazer, espaços comerciais, hortas comunitárias, espaços para pesca e outros. De acordo com a empresa, a execução depende da regularização do terreno e aprovação do projeto de loteamento, por isso, ainda não pôde ser iniciada.

Figura 28 - Planta baixa do complexo habitacional e espaços integrantes



Fonte: InovaHouse3d, 2022

Devido à construção realizada, em 2018 a fundadora da InovaHouse 3D foi convidada para representar o Brasil no evento "Incubadora de Negócios Internacional da Juventude" dos BRICS (OLIVEIRA, 2020). No ano seguinte, surgiu a empresa Domus 3D em Santa Catarina. Devido à convergência de metas, as três empresas se uniram e formaram uma única startup denominada 4Constru, que hoje trabalha em conjunto com o HUBIC da USP fornecendo equipamentos de impressão para pesquisas sobre o desenvolvimento de pastas cimentícias.

4.2 O HUBIC e a Impressão 3D de Concreto no Brasil

No Brasil, o HUBIC tem desempenhado um papel fundamental no desenvolvimento e promoção da impressão 3D de concreto. Criado a partir de uma parceria entre a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e a Associação Brasileira de Cimento Portland, o laboratório HUBIC, registrado na Figura 28, tem como objetivo impulsionar a inovação na construção civil por meio da impressão 3D de concreto.

Figura 29 - Laboratório do HUBIC



Fonte: Acervo pessoal, 2024

O HUBIC conta com uma equipe multidisciplinar de pesquisadores, que têm trabalhado no desenvolvimento de novas técnicas e materiais para a impressão 3D de concreto. Além disso, o

HUBIC também tem promovido a colaboração entre universidades, empresas, construtoras e instituições governamentais, visando acelerar a adoção dessa tecnologia no Brasil.

O projeto hubIC, primeiro espaço cooperativo de inovação e construção digital de base industrial do Brasil, surge como uma alternativa eficiente para impulsionar esse mercado. A plataforma é uma iniciativa inédita que une o mercado e alavanca o PD&I – Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação.

Entre as principais ações do hubIC está a inauguração de um laboratório batizado de Plataforma de Construção Digital (Figuras 29 e 30), onde se possa produzir componentes e edificações, com infraestrutura laboratorial multiuso entre Poli e ABCP para produção e impressão 3D de componentes cimentícios em escala 1:1. Alinhado à pesquisa e produção de elementos, a infraestrutura também estará disponível para a produção de materiais com outras bases.

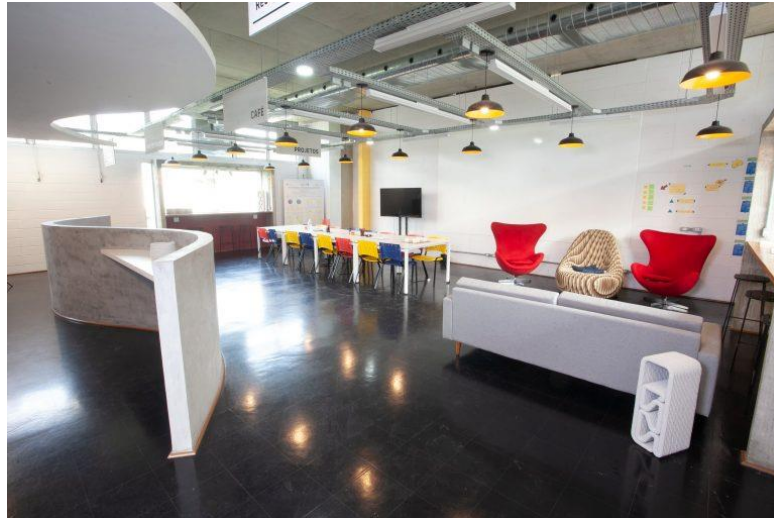
Figura 30 - Laboratório Hubic



Fonte: Hubic, 2024

Em paralelo, o projeto propõe a instalação de um espaço de trabalho compartilhado (coworking), para profissionais focados na elaboração de pesquisa e desenvolvimento de empresas e soluções consideradas promissoras.

Figura 31 - Espaço coworking Hubic



Fonte: Hubic, 2024

Em visita ao laboratório, foi possível analisar inúmeros tipos de peças impressas em materiais variados e presenciar uma impressão 3D em tempo real registrada na Figura 31. O projeto em questão é uma peça de um escritório de design de interiores que fez parceria com o laboratório Hubic, assim como outras diversas empresas.

Figura 32 - Impressão de uma peça decorativa



Fonte: Acervo pessoal, 2024

Desenvolvido pelo Studio Manga be, o banco de mobiliário urbano Itamaraty demonstrado na figura estabelece uma conexão entre material e processo de fabricação por meio da tecnologia de impressão 3D. O design do banco é inspirado nos arcos assimétricos das fachadas do Palácio da Marquesa do Itamaraty, no Rio de Janeiro, conhecido como Palácio-Cor-de-Rosa.

Figura 33 - Banco mobiliário urbano



Fonte: Studio Manga be

O material utilizado, o rejeito de minério de bauxita, é um subproduto da extração do minério, que, neste caso, é aproveitado como um material cimentício suplementar, substituindo parcialmente o cimento Portland. Essa substituição reduz o consumo de ligante nas composições do concreto e, conseqüentemente, impacta positivamente na redução da pegada de carbono associada à produção do cimento.

O banco, fabricado por impressão 3D de concreto, possui as dimensões de 1,60 x 0,40 x 0,45 cm e peso de 230 kg. Essa abordagem inovadora não só integra o design ao contexto cultural e histórico, mas também promove soluções mais sustentáveis e eficientes no uso de materiais e processos de fabricação na construção e no mobiliário urbano.

A impressão 3D tem emergido como uma tecnologia disruptiva no design e na produção de mobiliário urbano, oferecendo novas possibilidades para a criação de espaços públicos mais funcionais, sustentáveis e personalizados. A utilização dessa tecnologia no contexto urbano reflete uma mudança nos métodos tradicionais de fabricação, proporcionando soluções que não apenas otimizam os processos de produção, mas também oferecem uma abordagem mais flexível e inovadora para o design de elementos urbanos.

O protagonismo da impressão 3D no mobiliário urbano está relacionado a diversas vantagens que a tecnologia proporciona, como a redução de custos e tempo de produção, a customização de projetos e a utilização de materiais alternativos e mais sustentáveis. Ao contrário dos métodos convencionais de fabricação, que muitas vezes dependem de processos complexos e longos, a impressão 3D permite a criação de formas complexas e estruturas geométricas que seriam inviáveis com técnicas tradicionais. Essa flexibilidade no design é particularmente vantajosa em projetos urbanos, onde a funcionalidade e a estética precisam ser adaptadas ao contexto específico de cada local.

Outro aspecto relevante é a sustentabilidade proporcionada pela impressão 3D, especialmente quando materiais inovadores, como rejeitos industriais ou resinas recicláveis, são empregados no processo de fabricação. A possibilidade de utilizar materiais locais ou resíduos industriais, como o rejeito de minério de bauxita, não só reduz o impacto ambiental da produção de mobiliários urbanos, mas também contribui para a economia circular. Além disso, a impressão 3D permite a otimização do uso de materiais, uma vez que a produção é realizada de forma mais precisa, minimizando desperdícios.

A personalização é outra característica importante que impulsiona o uso da impressão 3D no mobiliário urbano. A tecnologia permite que os projetos sejam adaptados de acordo com as necessidades específicas de cada espaço público, seja em termos de funcionalidade, estética ou interação com os usuários. Bancos, bancos de praça, postes de luz, quiosques e outros elementos urbanos podem ser projetados com formas e funções específicas para atender à demanda local, o que é particularmente relevante em áreas com características culturais ou ambientais únicas.

Além disso, a impressão 3D no mobiliário urbano abre espaço para a colaboração interdisciplinar entre designers, engenheiros, urbanistas e arquitetos, promovendo soluções inovadoras e integradas para o espaço público. A digitalização do processo de design também facilita a implementação de modificações em tempo real, permitindo ajustes rápidos e eficientes durante a fase de desenvolvimento do projeto.

Em um cenário de crescimento urbano acelerado e desafios ambientais globais, o protagonismo da impressão 3D no mobiliário urbano se apresenta como uma solução promissora para melhorar a qualidade e a sustentabilidade das cidades. A capacidade de personalizar, otimizar o uso de materiais e reduzir o desperdício coloca essa tecnologia como uma ferramenta

estratégica na busca por ambientes urbanos mais inteligentes, inclusivos e sustentáveis, alinhados com as demandas contemporâneas por inovação e eficiência.

No campo específico do mobiliário urbano, o HUBIC tem incentivado a utilização da impressão 3D para a produção de elementos urbanos mais eficientes, personalizados e sustentáveis. A instituição tem se dedicado a estudar e aplicar o uso de tecnologias como a impressão 3D de concreto, explorando não só as possibilidades de design inovador, mas também as vantagens ambientais que podem ser proporcionadas por materiais alternativos e processos de fabricação mais eficientes.

Além disso, o HUBIC tem colaborado com diversas empresas e startups do setor de tecnologia e construção, criando um ecossistema de inovação para a fabricação de componentes urbanos personalizados. Por meio dessas parcerias, a USP tem promovido experimentos e protótipos de mobiliário urbano, como bancos e estruturas de concreto, utilizando a impressão 3D para reduzir desperdícios e otimizar o uso de materiais. Em muitos desses projetos, o HUBIC tem explorado o uso de materiais sustentáveis, como o concreto com aditivos recicláveis ou rejeitos industriais, com o objetivo de reduzir a pegada de carbono da construção civil.

Em resumo, o HUBIC tem sido um ponto de vanguarda na aplicação da impressão 3D no mobiliário urbano, promovendo a inovação e a sustentabilidade, enquanto prepara o setor de construção para as mudanças tecnológicas que moldarão o futuro das cidades inteligentes. Através de suas pesquisas, parcerias e programas educativos, o HUBIC tem contribuído para o avanço de soluções inovadoras que estão remodelando o espaço urbano e o processo de fabricação na construção civil.

No HUBIC, um dos outros projetos em andamento é um protótipo de uma cozinha, registrado na Figura 32, que foi escolhida devido à sua complexidade de instalações hidráulicas e questões de limpabilidade. O objetivo do estudo é executar esse ambiente por completo de forma a compreender todos os processos construtivos envolvidos durante a impressão. O projeto está em fase inicial, e até o momento foi equacionado o composto cimentício e também foram realizadas algumas amostras de pintura e revestimento cerâmico.

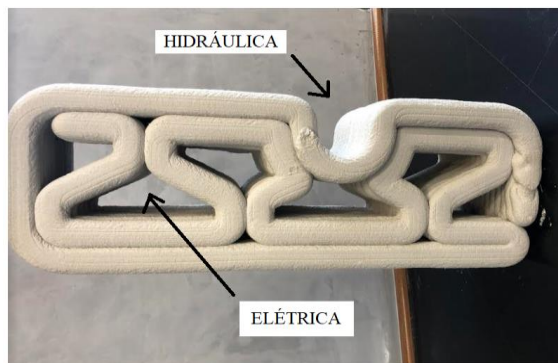
Figura 34 - Projeto da cozinha impressa



Fonte: Acervo pessoal, 2024

A equipe responsável pelo projeto tem como desafio otimizar a forma de execução das instalações hidráulicas e elétricas. A princípio serão utilizadas cavidades no formato da impressão, conforme indicado na Figura 33, para permitir passagens de sistemas prediais conforme mostrado na figura a seguir, mas tudo relacionado aos acabamentos ainda está em fase experimental e é essencial a parceria com construtoras para trazer opções práticas e aplicáveis no cenário da construção brasileira.

Figura 35 - Detalhe de cavidades na parede impressa



Fonte: Acervo pessoal, 2024

5. DESAFIOS PARA O USO DA MANUFATURA ADITIVA NA CONSTRUÇÃO

5.1 Equipamentos

A principal barreira econômica associada ao uso de impressão 3D na construção civil reside no alto custo dos equipamentos necessários. As impressoras 3D de grande porte usadas na construção civil, geralmente de extrusão de concreto, possuem tecnologias avançadas que permitem a deposição precisa de camadas de material para formar elementos estruturais. No entanto, a complexidade desses sistemas resulta em um custo inicial elevado, que inclui não apenas a compra da impressora, mas também a instalação, manutenção e possíveis atualizações tecnológicas necessárias para manter o equipamento em funcionamento eficiente. Estima-se que o custo inicial de uma impressora 3D de concreto de alta qualidade pode variar de centenas de milhares a alguns milhões de dólares, dependendo da capacidade e do fabricante. (NIEMANN, 2019)

Além do custo direto da máquina, há também a necessidade de infraestrutura adicional, como energia elétrica de alta capacidade, sistemas de bombeamento de concreto e plataformas de suporte para as impressoras. Essas exigências podem aumentar significativamente o investimento inicial, especialmente em canteiros de obras que não estão adaptados para acomodar esses equipamentos.

Outro fator limitante é a durabilidade e a vida útil dessas impressoras. A manutenção contínua é necessária para garantir a precisão e a qualidade das impressões, o que pode gerar custos adicionais ao longo do tempo. Além disso, os avanços tecnológicos no campo da impressão 3D são rápidos, levando à necessidade de atualizações frequentes, o que adiciona mais uma camada de custo para empresas que desejam permanecer competitivas no uso da tecnologia (ZHAO, 2020).

5.2 Materiais

Os materiais utilizados na impressão 3D de concreto também apresentam desafios econômicos e técnicos. Embora a base dos materiais seja semelhante ao concreto convencional (cimento, agregados e água), as formulações usadas em impressão 3D precisam ser adaptadas para garantir fluidez, tempo de cura controlado e resistência estrutural adequada. O desenvolvimento dessas formulações especiais pode envolver o uso de aditivos químicos, como plastificantes e

aceleradores de cura, que aumentam o custo dos materiais em comparação com o concreto tradicional (PÉREZ, 2020).

A fluidez é um aspecto crucial para a impressão 3D, pois o material deve ser capaz de passar pela cabeça de extrusão da impressora sem obstruções, mantendo, ao mesmo tempo, a coesão necessária para evitar o colapso das camadas imediatamente após a deposição. Esses requisitos demandam um equilíbrio técnico difícil de alcançar, o que resulta em uma maior complexidade na produção e maior custo do material impresso. Em alguns casos, os fabricantes de impressoras exigem o uso de materiais proprietários, o que pode aumentar ainda mais os custos, já que as empresas de construção ficam restritas a um pequeno grupo de fornecedores.

Além disso, há a necessidade de testar e certificar esses materiais para garantir que atendam às normas de segurança e desempenho estrutural vigentes. Esse processo de certificação pode ser demorado e caro, criando mais uma barreira econômica para a adoção em larga escala da tecnologia.

5.3 Normas técnicas e modelos de dimensionamento

Outro desafio para a adoção da impressão 3D no setor da construção civil é a ausência de normas técnicas amplamente estabelecidas para a parametrização e caracterização dos materiais usados nesse processo. Em métodos construtivos convencionais, as normas desempenham um papel fundamental na garantia da segurança, durabilidade e qualidade das obras. Elas regulamentam desde a composição e resistência dos materiais até os procedimentos de execução e inspeção em campo. Contudo, a impressão 3D de concreto, por ser uma tecnologia emergente, ainda não possui um conjunto consolidado de normas específicas.

Apesar da existência da ASTM NBR 52900, que cita a respeito da nomenclatura da manufatura aditiva, a ausência de outras normas claras afeta diretamente a viabilidade comercial e operacional da impressão 3D, pois as empresas enfrentam incertezas quanto ao desempenho estrutural das construções. É de grande importância correlacionar as características da impressão 3D com as normas de desempenho já existentes no meio da construção civil. Sem uma regulamentação específica, a validação de projetos se torna mais complexa, aumentando os riscos para construtoras e investidores. Além disso, o desenvolvimento de novas normas é um processo lento, que demanda estudos extensivos sobre as propriedades dos materiais,

métodos de ensaio e comportamentos sob diferentes condições de carregamento. Atualmente, a maioria dos projetos que utilizam impressão 3D é submetida a normas gerais de construção em concreto, que não foram desenhadas para lidar com as particularidades desse método, como a deposição camada por camada. (ZHAO, 2020)

A lacuna normativa também cria desafios na aceitação dos projetos por órgãos reguladores e certificadores, dificultando a obtenção de aprovações para obras que utilizam impressão 3D. Esse cenário desacelera a implementação da tecnologia, uma vez que investidores e construtores têm receio de enfrentar complicações legais ou de segurança em projetos não regulamentados.

Além da falta de normas técnicas, a ausência de modelos de dimensionamento específicos para estruturas impressas em 3D representa uma barreira significativa. Os métodos tradicionais de dimensionamento de estruturas de concreto, amplamente utilizados na engenharia estrutural, baseiam-se em pressupostos teóricos e empíricos desenvolvidos ao longo de décadas de estudo de materiais convencionais e técnicas construtivas tradicionais, como o concreto moldado in loco ou pré-fabricado. No entanto, esses modelos não são totalmente aplicáveis à impressão 3D de concreto devido às peculiaridades do processo.

A impressão 3D na construção civil se distingue pela deposição sequencial de camadas de material, o que altera as propriedades mecânicas do concreto. A resistência e o comportamento estrutural podem variar entre as direções de deposição e entre as camadas, introduzindo novas complexidades na modelagem do desempenho da estrutura. Modelos de dimensionamento convencionais, que assumem uniformidade nas propriedades do concreto, não conseguem capturar adequadamente esses efeitos anisotrópicos e os potenciais pontos de falha entre as camadas impressas.

Outro aspecto crítico é a falta de dados experimentais robustos sobre o comportamento de estruturas impressas em 3D sob diferentes condições de carregamento, como compressão, flexão, cisalhamento e impactos dinâmicos. Esses dados são fundamentais para a criação de modelos de dimensionamento que possam ser incorporados a normas de engenharia. Sem tais modelos, o processo de design estrutural para impressão 3D depende de análises experimentais customizadas para cada projeto, o que torna o desenvolvimento de obras mais caro e demorado, além de menos previsível.

Além disso, a heterogeneidade dos materiais e dos processos de impressão, que variam de acordo com o fabricante e o projeto, agrava a falta de uniformidade nos parâmetros de dimensionamento. Cada impressora e mistura de concreto podem resultar em diferentes propriedades mecânicas, tornando difícil o desenvolvimento de um modelo de dimensionamento universal. Isso implica que, até que modelos apropriados sejam desenvolvidos e validados, a impressão 3D na construção civil continuará a enfrentar limitações em termos de aceitação normativa e de segurança.

Para superar essas barreiras, é necessária uma colaboração entre a academia, a indústria e os órgãos reguladores para o desenvolvimento de novas normas e modelos de dimensionamento que considerem as especificidades da impressão 3D. O avanço de estudos experimentais, aliados a simulações computacionais, será crucial para estabelecer critérios confiáveis de desempenho estrutural e durabilidade das construções impressas.

A criação de normas técnicas específicas para a impressão 3D e de modelos de dimensionamento adaptados à tecnologia trará maior segurança e previsibilidade ao uso dessa inovação na construção civil. A padronização não apenas facilitará a aprovação regulatória, como também permitirá a otimização de processos e a redução de custos a longo prazo, tornando a impressão 3D uma solução mais viável e competitiva no mercado da construção.

A falta de normas técnicas específicas e de modelos de dimensionamento adequados para a impressão 3D na construção civil constitui uma barreira técnica e regulatória significativa. Esses desafios limitam o uso da tecnologia em projetos em larga escala e inibem a confiança de engenheiros, construtores e investidores. O desenvolvimento de novas diretrizes e modelos robustos, adaptados às características únicas da impressão 3D, será essencial para promover a massificação dessa tecnologia no setor de construção.

5.4 Cultura da construção civil: Resistência à impressão 3D e a predominância de tecnologias tradicionais

A adoção de novas tecnologias na construção civil, como a impressão 3D, enfrenta uma barreira significativa relacionada à cultura do setor, amplamente baseada em métodos construtivos tradicionais e no uso intensivo de mão de obra. Esse contexto cria desafios estruturais para a implementação de inovações tecnológicas, uma vez que o setor historicamente se caracteriza por ser conservador e lento na incorporação de novas práticas.

5.4.1 Predominância de Tecnologias Tradicionais

A construção civil é um setor que, ao longo de décadas, consolidou-se em torno de tecnologias tradicionais, como a alvenaria, o concreto moldado in loco e os sistemas pré-fabricados. Esses métodos são amplamente difundidos e aceitos globalmente, tendo se estabelecido como padrão devido à sua eficácia comprovada, disponibilidade de materiais e mão de obra, e sua compatibilidade com as normas e regulamentos existentes. Por isso, a introdução de uma tecnologia disruptiva como a impressão 3D encontra resistência, uma vez que rompe com práticas já consolidadas e exige mudanças significativas no processo construtivo. (GONZALES, 2018)

A impressão 3D, ao automatizar grande parte da construção, requer uma transformação na abordagem dos projetos, com uma maior dependência de equipamentos de alta tecnologia e menos intervenção humana direta. Essa mudança implica não apenas no treinamento de equipes, mas também na adaptação de processos de projeto, gestão e execução de obras, algo que contrasta com a prática consolidada no setor. Além disso, a integração de novos equipamentos e sistemas exige investimentos em infraestrutura e na revisão de normativas e práticas de controle de qualidade, o que muitas empresas do setor podem ver como arriscado ou oneroso em um primeiro momento.

5.4.2 Uso Intensivo de Mão de Obra

A construção civil tradicional é também uma indústria intensiva em mão de obra. No Brasil, por exemplo, o setor emprega milhões de trabalhadores, sendo uma das principais fontes de emprego formal e informal. Em contextos em que a mão de obra é abundante e os custos trabalhistas são relativamente baixos, as empresas têm menos incentivo para adotar tecnologias automatizadas como a impressão 3D, que reduziria significativamente a necessidade de mão de obra direta. O uso intensivo de trabalhadores manuais é parte de um modelo produtivo que tem sido eficaz em diversos países, especialmente em mercados emergentes, onde a mão de obra representa um custo competitivo frente à automação. (PEREIRA, 2021)

Essa característica cultural gera uma barreira para a inovação tecnológica, pois a substituição da mão de obra tradicional por máquinas pode ser vista como uma ameaça ao emprego e à estabilidade do setor. Além disso, muitos trabalhadores da construção têm pouca ou nenhuma formação técnica, o que cria um desafio adicional para a transição para novas tecnologias que

exigem maior qualificação, como a operação de impressoras 3D. Empresas que dependem fortemente da mão de obra manual enfrentam um dilema: investir em tecnologia e potencialmente reduzir postos de trabalho ou continuar com métodos tradicionais, mantendo a demanda por trabalhadores e minimizando o risco de alienação da força de trabalho.

5.4.3 Resistência Cultural à Mudança

A construção civil é conhecida por sua aversão ao risco e por uma mentalidade conservadora em relação à adoção de novas tecnologias. Projetos de grande escala na construção geralmente envolvem altos custos iniciais e prazos longos, o que faz com que construtores e engenheiros busquem minimizar incertezas. A impressão 3D ainda é percebida como uma tecnologia emergente, e a falta de experiências anteriores e resultados comprovados em larga escala aumenta a relutância em adotar essa inovação (PEREIRA, 2021).

Outro fator que reforça essa resistência é a complexidade dos projetos de construção, que envolvem muitas pessoas, incluindo arquitetos, engenheiros, operários, gerentes de projeto e fornecedores. A introdução de novas tecnologias como a impressão 3D afeta todas essas partes, exigindo coordenação e integração de novas habilidades e processos. A mudança cultural necessária para que a indústria adote essa tecnologia é, portanto, profunda, impactando desde o nível operacional até o nível de planejamento estratégico.

Além disso, as empresas de construção tradicionais tendem a valorizar a experiência prática acumulada ao longo de anos com técnicas convencionais, muitas vezes preferindo seguir metodologias testadas em vez de arriscar em tecnologias que ainda estão em fase de experimentação e desenvolvimento. A confiança nas habilidades e no conhecimento de gerações de trabalhadores e engenheiros se contrapõe à incerteza associada a inovações como a impressão 3D, cujos benefícios ainda precisam ser totalmente comprovados em projetos de larga escala.

5.4.4 Desafios na Capacitação e Educação

A transição de uma cultura baseada em mão de obra intensiva para uma baseada em tecnologia exige uma mudança significativa no perfil dos profissionais da construção. A impressão 3D requer conhecimentos técnicos avançados em áreas como automação, robótica e ciência dos materiais. No entanto, a força de trabalho tradicional do setor de construção, em grande parte

composta por operários qualificados na prática e não necessariamente em tecnologia, carece de preparação para lidar com essas inovações. (MARTINS, 2020)

Essa lacuna de capacitação reforça a barreira cultural, uma vez que a adaptação a novas tecnologias exigiria investimentos em treinamento e educação, além de uma reestruturação dos currículos dos cursos técnicos e de engenharia para incluir tópicos relacionados à impressão 3D. Empresas e instituições de ensino precisam estar alinhadas para formar profissionais que atendam às novas demandas tecnológicas do setor, mas essa transformação é lenta e requer tempo e recursos.

A cultura predominante na construção civil, baseada no uso de tecnologias tradicionais e intensiva em mão de obra, cria uma barreira significativa para a adoção de métodos inovadores como a impressão 3D. A resistência cultural, a falta de capacitação técnica e a percepção de risco e incerteza associadas à tecnologia retardam sua aceitação em larga escala. Para que a impressão 3D seja adotada de forma mais ampla, será necessário um esforço coordenado entre as empresas do setor, órgãos reguladores e instituições de ensino para superar a inércia cultural, promover a capacitação técnica e demonstrar os benefícios econômicos e produtivos da tecnologia no longo prazo. (MARTINS, 2020)

Além disso, a adoção da impressão 3D na construção civil exige uma transformação na capacitação dos projetistas, especialmente em termos de capacitação e adaptação às novas tecnologias. Projetos devem ser compatíveis com as exigências da manufatura aditiva, o que implica o uso de softwares de modelagem 3D, como BIM e programas paramétricos, para criar modelos digitais que atendam às particularidades do processo de impressão. Esses softwares precisam considerar limitações geométricas, resistência do material e a capacidade dos equipamentos de impressão, exigindo que os projetistas adquiram conhecimentos avançados em áreas como automação, robótica e ciência dos materiais. No entanto, a força de trabalho tradicional do setor, ainda baseada em uma cultura manual e com pouca formação técnica em tecnologias digitais, enfrenta dificuldades para adaptar-se a essas inovações. A capacitação contínua, portanto, não se limita ao aprendizado de novos softwares, mas também envolve uma mudança nas práticas de desenvolvimento de projetos, alinhando habilidades técnicas com as capacidades e restrições dos equipamentos de impressão.

5.5 Interface com outros subsistemas na impressão 3D na construção civil: Desafios de integração e conectividade

A adoção da impressão 3D na construção civil, embora inovadora e promissora, enfrenta um desafio técnico significativo na integração com os demais subsistemas construtivos, como os sistemas hidráulico, elétrico, esquadrias e revestimentos. A construção tradicional tem desenvolvido métodos e práticas que permitem uma coordenação eficaz entre os diferentes subsistemas, facilitando a instalação, manutenção e operação ao longo da vida útil da edificação. No entanto, o processo de impressão 3D de concreto ainda carece de soluções padronizadas e eficientes para lidar com a conexão e inserção desses sistemas dentro de estruturas impressas, o que representa uma barreira à sua implementação em larga escala.

Com relação a essas questões, durante a visita ao laboratório Hubic, foram realizadas entrevistas com os funcionários, os quais indicaram os principais desafios de integração e conectividade enfrentados na implementação da impressão 3D na construção civil redigidos a seguir.

5.5.1 Desafios de Conectividade com o Sistema Hidráulico

A instalação do sistema hidráulico em construções impressas em 3D requer ajustes que podem ser complexos. Na construção convencional, o posicionamento das tubulações de água e esgoto é previsto e embutido nas paredes ou forros durante a fase de construção ou em paredes de gesso acartonado ou alvenaria, onde é possível realizar cortes ou rasgos para acomodar as tubulações.

No caso da impressão 3D de concreto, as paredes são impressas em camadas contínuas, o que dificulta a criação de aberturas para a passagem das tubulações durante o processo de construção. A introdução dessas aberturas, ou a necessidade de interromper a impressão para acomodar componentes hidráulicos, compromete a eficiência do processo, podendo gerar descontinuidades que afetam a resistência estrutural. Além disso, se as aberturas forem feitas após a impressão, isso implicaria no uso de ferramentas de corte que podem comprometer a integridade do concreto impresso, além de demandar um retrabalho que contradiz a eficiência esperada da impressão 3D.

Uma possível solução para esse desafio envolve a utilização de softwares de modelagem que integram o projeto hidráulico ao projeto estrutural impresso em 3D, possibilitando que as tubulações sejam consideradas já no processo de impressão, com canais específicos criados

diretamente na estrutura impressa. No entanto, essa prática ainda está em fase de desenvolvimento e necessita de maior maturidade tecnológica e de padronização para se tornar viável em escala comercial.

5.5.2 Desafios de Integração com o Sistema Elétrico

A instalação do sistema elétrico em construções impressas em 3D enfrenta desafios semelhantes aos do sistema hidráulico. Na construção tradicional, os eletrodutos e caixas de passagem elétrica são inseridos nas paredes antes do revestimento final, ou mesmo embutidos em forros falsos e chumbados nas alvenarias. No entanto, em paredes impressas em 3D, a passagem de eletrodutos é complicada pela própria natureza do processo, que não permite facilmente a introdução de componentes dentro das camadas de concreto durante a impressão.

Essa dificuldade exige soluções alternativas, como a predefinição de canais ou tubulações durante o processo de modelagem digital do edifício, por meio de sistemas BIM (*Building Information Modeling*), para que esses canais sejam diretamente impressos junto com a estrutura. No entanto, essa solução também demanda maior coordenação e precisão nos processos, além de aumentar a complexidade do planejamento da obra.

Outra solução é a utilização de eletrodutos aparentes ou a criação de soluções modulares que permitam a integração de sistemas elétricos após a impressão da estrutura principal. No entanto, essas soluções podem afetar a estética e a funcionalidade da edificação, além de possivelmente comprometer os benefícios econômicos esperados da impressão 3D.

5.5.4 Conexão com Esquadrias

A instalação de esquadrias (portas e janelas) em edifícios impressos em 3D apresenta outro desafio relevante. Na construção tradicional, os vãos para portas e janelas são deixados durante o processo de alvenaria ou estrutura, com molduras adequadas sendo instaladas para receber os elementos de esquadria. Na impressão 3D, criar aberturas precisas e adequadas para esquadrias é mais complexo devido à natureza do processo de deposição camada por camada.

Durante a impressão, os vãos para janelas e portas precisam ser previstos com antecedência no modelo digital, o que exige um planejamento preciso e a inserção de espaçadores temporários para garantir que os vãos mantenham a integridade estrutural até a instalação final das esquadrias. No entanto, essa abordagem pode resultar em desafios práticos, como a falta de

flexibilidade para ajustes de última hora e a necessidade de adaptação de componentes de esquadria já existentes no mercado, que não são necessariamente compatíveis com as superfícies irregulares de concreto impresso.

Alternativamente, o desenvolvimento de sistemas de esquadrias modulares, desenhados especificamente para estruturas impressas em 3D, pode facilitar esse processo, mas isso requer colaboração entre fabricantes de esquadrias e empresas de tecnologia de impressão 3D, além de aumentar o custo inicial da obra.

5.5.5. Revestimentos e Acabamentos

A aplicação de revestimentos, como azulejos, pinturas e acabamentos em geral, também representa um desafio técnico nas construções impressas em 3D. As paredes impressas não apresentam a mesma regularidade e acabamento superficial que uma parede convencional, muitas vezes sendo visíveis as linhas de cada camada depositada pela impressora. Isso pode resultar em dificuldades para a aplicação de revestimentos ou até mesmo exigir processos adicionais de nivelamento, o que reduz a eficiência que a impressão 3D promete.

Em muitos casos, o acabamento final da superfície impressa requer o uso de materiais específicos para corrigir imperfeições e garantir uma aderência adequada dos revestimentos. Isso pode aumentar os custos e o tempo de construção, contrapondo-se à promessa inicial de maior rapidez e economia associada à impressão 3D.

Outra solução proposta é o desenvolvimento de misturas de concreto que, quando impressas, já proporcionam um acabamento mais liso e uniforme, eliminando ou reduzindo a necessidade de revestimentos adicionais. No entanto, essas misturas são mais complexas e caras, além de ainda estarem em fase de pesquisa e desenvolvimento.

5.5.6 Perspectivas para a Integração de Subsistemas

Para que a impressão 3D de concreto se torne uma solução viável em larga escala na construção civil, é essencial que se desenvolvam metodologias eficazes para integrar os sistemas hidráulico, elétrico, de esquadrias e de revestimentos de forma harmoniosa com as estruturas impressas. A criação de processos integrados por meio de modelagem digital avançada, como

o uso de BIM, é uma solução promissora para garantir que os subsistemas sejam considerados no projeto desde a fase inicial e incorporados durante o processo de impressão.

Além disso, a colaboração entre os diversos fornecedores e fabricantes de componentes da construção civil, incluindo aqueles que fornecem sistemas hidráulicos, elétricos, esquadrias e revestimentos, será fundamental para o desenvolvimento de soluções customizadas e adaptadas para construções impressas. A padronização e a criação de componentes modulares específicos para impressão 3D, bem como a automação de processos de instalação, podem contribuir para superar essas barreiras de integração.

A interface entre a impressão 3D de concreto e os subsistemas construtivos convencionais ainda representa uma barreira significativa para a implementação ampla da tecnologia. A falta de soluções padronizadas e a necessidade de adaptação dos sistemas hidráulico, elétrico, esquadrias e revestimentos às estruturas impressas impõem desafios técnicos e financeiros. Para superar essas barreiras, será necessário desenvolver tecnologias e metodologias que permitam a integração eficiente desses subsistemas, além de promover maior colaboração entre a indústria da construção e os setores de tecnologia, garantindo que a impressão 3D possa ser utilizada de forma eficiente e sustentável em larga escala.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As tecnologias de manufatura aditiva possuem o potencial de transformar a indústria da construção civil, revolucionando a concepção, construção e ocupação dos espaços. Especificamente, as técnicas de impressão 3D de concreto têm demonstrado um significativo potencial para otimizar processos construtivos, aumentar a eficiência, reduzir o desperdício de materiais e permitir a criação de estruturas arquitetônicas personalizadas e inovadoras.

No contexto mais amplo, essa tecnologia tem a capacidade de mitigar os impactos ambientais da construção civil. Além de reduzir o desperdício de materiais e a geração de resíduos, ela viabiliza a utilização de materiais mais sustentáveis, que causam menos danos ao meio ambiente em comparação com os materiais tradicionais. Isso se traduz em uma produção mais ágil, com ciclos de construção mais curtos e personalização de produtos conforme as necessidades individuais (KHOSHNEVIS, 2004). Ademais, outra vantagem significativa 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.

Embora existam limitações associadas à impressão 3D em concreto, pouca ênfase é dada a esses desafios. A ausência de relatos de casos mal-sucedidos dificulta a identificação dos principais obstáculos. Até o momento, não há construções completamente realizadas por impressão 3D. Muitas tarefas manuais ainda são necessárias em conjunto com a manufatura aditiva, ou mesmo a combinação com outras tecnologias de construção off-site. Na construção de edificações, a impressão 3D é limitada a paredes e pilares. As lajes só podem ser impressas se forem pré-moldadas e posteriormente instaladas no local. As demais etapas de construção, como esquadrias, acabamentos e instalações prediais, são realizadas manualmente.

Além disso, mesmo nas estruturas impressas, é necessário esforço manual para o ajuste fino de detalhes de acabamento de superfície e vedação de vãos entre esquadrias ou nas interfaces entre a estrutura e outros sistemas construtivos. Antes que a tecnologia da manufatura aditiva se torne uma realidade comum nos canteiros de obras, é necessário superar dificuldades de cunho normativo. A ausência de normatização representa uma barreira para a aceitação de novas tecnologias pelo mercado.

Atualmente, a construção com impressão 3D ainda se limita a protótipos e projetos pontuais, embora o setor esteja em evolução. Já é possível observar a formação de uma cadeia produtiva especializada, composta por construtoras, fabricantes de equipamentos e produtores de argamassas. Estados Unidos e China estão entre os países mais engajados no desenvolvimento dessa tecnologia, enquanto Dubai se destaca como o maior investidor, implementando políticas públicas de incentivo ao uso da impressão 3D em obras. Estudos indicam que Dubai pretende ter 25% das construções em andamento utilizando essa tecnologia até 2025.

As perspectivas para os próximos cinco anos são promissoras, com projetos em andamento que podem marcar o início da produção em larga escala no setor. A empresa ICON, por exemplo, está liderando a construção de um bairro de casas em Austin, Texas, considerado o maior projeto conhecido até o momento.

No Brasil, no entanto, a situação ainda é incipiente, com baixa produção científica nacional e poucas empresas interessadas em investir no setor. A natureza conservadora da indústria da construção, que ainda adota métodos artesanais tradicionais e está ciente dos riscos gerenciais envolvidos, é um fator significativo que limita o avanço dessa tecnologia. Além disso, os elevados custos iniciais de desenvolvimento, incluindo a aquisição de equipamentos especializados e a capacitação de profissionais, também representam barreiras.

De acordo com Martinelli (2020), espera-se que o mercado brasileiro absorva a tecnologia como uma ferramenta para imprimir módulos pré-fabricados que auxiliarão nas construções, adotando um conceito híbrido. Isso permitirá a identificação das metodologias de construção mais vantajosas para cada área de um projeto, utilizando a impressão 3D apenas aonde for mais benéfico, otimizando alguns processos.

Sugestões de trabalhos futuros

- Estudo das normas existentes para construção civil e sua aplicabilidade para a manufatura aditiva
- Análise de testes de desempenho de materiais cimentícios impressos, como resistência à compressão, flexão e cisalhamento
- Soluções alternativas para solucionar a interface dos subsistemas com as paredes impressas

2. REFERÊNCIAS

ARUNOTHAYAN, A. R.; NEMATOLLAHI, B.; RANADE, R.; BONG, S. H.; SANJAYAN, J. Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction. *Construction and Building Materials*, v. 257, 2020.

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

BELL, C. 3D printing with delta printers. 2015.

BUSWELL, R. A. et al. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, v. 112, p. 37–49, 2018.

CAMACHO, D. D.; CLAYTON, P.; O'BRIEN, W. J.; SEEPERSAD, C.; JUENGER, M.; FERRON, R.; SALAMONE, S. Applications of additive manufacturing in the construction industry: a forward-looking review. *Automation in Construction*, v. 89, p. 110-119, maio 2018.

CAMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Construção Sustentável: a Mudança em Curso. 2017. 98 p.

CASADEI, V. Indústria 4.0: Como a Inteligência Artificial pode ajudar? Disponível em: <https://medium.com/@vcasadei/ind%C3%BAstria-4-0-como-a-intelig%C3%A2ncia-artificial-pode-ajudar-39a2793e0b75>.

CDB, P. 2022 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION. 2022.

CUTIERU, A. ICON conclui primeira casa de sua nova série de projetos com construção aditiva.

DEANS, M. G-Code: The CNC Programming Language.

EL-SAYEGH, S.; ROMDHANE, L.; MANJIKIAN, S. A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2020.

FLORENCIO, E. Q.; QUINTELLA, I. P. C. P.; FERREIRA SEGUNDO, D. B. O futuro do processo construtivo? A impressão 3D em concreto e seu impacto na concepção e produção da arquitetura. *Blucher Design Proceedings*, v. 3, n. 1, p. 305-309, 2016.

FLORENCIO, Eduardo Quintella. A impressão 3D em concreto e seu impacto na produção da arquitetura: o futuro da construção civil? 2019. 161 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

FREITAS, Danilo José Pereira et al. Avaliação da construtibilidade e do desempenho mecânico de elementos de concreto com fibras produzidos por manufatura aditiva, 2023.

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.

HUBIC, Inovação e construção digital. Disponível em: <https://hubic.org.br/>.

ICON BUILD. Technology for Humanity's Future 2024. Disponível em: <https://www.iconbuild.com/>.

KHOSHNEVIS, B. Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. *Automation in Construction*, 2004.

KUMAR, K.; ZINDANI, D.; DAVIM, J. P. *Industry 4.0: Developments towards the Fourth Industrial Revolution*. Singapore: Springer Singapore, 2019.

LAGE, Rangel. Primeira casa construída com impressora 3D no Brasil. 2020. Disponível em: <http://rangellage.com.br/primeira-casa-construida-com-impressora3d-no-brasil/>.

LABONNOTE, N.; RONNQUIST, A.; MANUM, B.; RUTHER, P. Additive Construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, v. 72, p. 347-366, 2016.

LIM, S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, n. 21, p. 262-268, 2012.

MARTINELLI, Juliana. Brasil constrói sua primeira casa modelo impressa em 3D! Inova House 3D, 2020. Disponível em: <https://www.inovahouse3d.com.br/post/brasil-constr%C3%B3i-sua-primeira-casa-modelo-impressa-em-3d>.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. Reinventing Construction - A Route to Higher Productivity. McKinsey & Company, 2017.

MOHAN, M. K.; RAHUL, A. V.; VAN TITTELBOOM, K.; DE SCHUTTER, G. Rheological and pumping behaviour of 3D printable cementitious materials with varying aggregate content. *Cement and Concrete Research*, v. 139, 2021.

NATIONS, United. World population prospects 2019. Department of Economic and Social Affairs, n. 141, 2019.

NEMATOLLAHI, B.; XIA, M.; SANJAYAN, J. Current progress of 3D concrete printing technologies. In: *34TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION*, p. 260-267, 2017, Taiwan. Anais [...] Taiwan: ISARC, 2017.

OLIVEIRA, G. Estudante idealizadora da primeira casa impressa em 3D do Brasil vai representar o país na Rússia. 2020.

PAN, E. Análise do cenário atual de desenvolvimento da tecnologia de manufatura aditiva com composições cimentícias aplicadas à construção civil, 2024.

PANDA, B.; CHANDRAPAUL, S.; JENTAN, M. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material, 2017.

PEREIRA, F. A. Automação e mão de obra na construção civil: um estudo sobre a resistência à mudança. *Revista de Administração e Inovação*, v. 18, n. 2, p. 100-117, 2021.

PÉREZ, J. et al. Mechanical performance of 3D printed concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 254, p. 119190, 2020.

PUNHAGUI, K. et al. Estudo de Baixo Carbono para a Indústria de Cimento no Estado de São Paulo de 2014 a 2030. [s.l.] CETESB, 2018.

REGADAS. Otimização de uma impressora 3D Delta e desenvolvimento da impressão simultânea de 3 cores, 2017.

ROSCHLI, A. et al. Designing for Big Area Additive Manufacturing. *Additive Manufacturing*, v. 25, p. 275–285, jan. 2019.

RUBIN, A. P.; HASSE, J. A.; QUINTANILHA, L. C.; REPETTE, W. L. Influência do teor de fíler calcário nas propriedades de concretos para impressão 3D. Florianópolis: 21 p., 2020.

RUBIN, A. P.; HASSE, J. A.; REPETTE, W. L. The evaluation of rheological parameters of 3D printable concretes and the effect of accelerating admixture. *Construction and Building Materials*, v. 276, p. 122221, 2021.

SCHULDT, Steven J. A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments. *Automation in Construction*, [s.l.]: Elsevier, 19 fev. 2021.

SCHUTTER, G.; LESAGE, K.; MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V.; HABERT, G.; AUGUSTÍ-JUAN, I. Vision of 3D printing with concrete: Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research*, v. 112, p. 25-36, 2018.

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

SOUZA, J. P. et al. The SPIDERobot: A Cable-Robot System for On-site Construction in Architecture. In: *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, p. 230-239, 2016.

SOUZA, M. T. et al. 3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects. *Journal of Building Engineering*, v. 32, p. 101833, nov. 2020.

TOFAIL, S. A. M. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials Today*, v. 21, n. 1, p. 22–37, jan. 2018.

ZHAO, Z. et al. Current status and future development of 3D printing in construction. *Journal of Cleaner Production*, v. 258, p. 120750, 2020.