



Soluções projetuais utilizando a impressão 3D e os materiais naturais

Design solutions using 3D printing and natural materials

Monique de Brito Filgueiras, Mestra, Universidade Estadual de Londrina

monique.filgueiras@uel.br

Gabriela Willemann Siviero Maximo, Doutora, Universidade Federal de Santa Catarina

gabrielawillemansivieromaximo@gmail.com

Lisiane Ilha Librelotto, Doutora, Universidade Federal de Santa Catarina, VirtuHab

lisiane.librelotto@gmail.com

Mara Regina Pagliuso Rodrigues, Doutora, Universidade Federal de Santa Catarina

mara@ifsp.edu.br

Lara Marina Vidal, Universidade Federal de Santa Catarina

laraavidal2@gmail.com

Resumo

A Lara Marina Vidal impressão 3D é uma tecnologia que pode tornar as estruturas mais sustentáveis e personalizadas, uma vez que reduz o desperdício de construção e possibilita a utilização de materiais diversificados na sua composição, bem como oportuniza a elaboração de projetos mais criativos. Para isso, este artigo teve como objetivo investigar a ampla adoção e sucesso da tecnologia de impressão 3D em escala global, em paralelo com a incorporação estratégica de materiais naturais nesse contexto. Através da realização de uma busca exploratória em artigos científicos de divulgação aberta e online, foram encontradas publicações que se concentraram em informações referentes à manufatura aditiva aplicada para a construção civil, à tecnologia que envolve a impressão 3D e à aplicação de materiais naturais no contexto de projetos. Como resultado, a pesquisa concluiu que há desafios e possibilidades para a impressão 3D na arquitetura, uma tecnologia que pode revolucionar o setor da construção. Entre os principais desafios estão a escala, a qualidade dos materiais, a regulamentação e a sustentabilidade. No entanto, evidencia-se que é preciso superar essas barreiras para que a impressão 3D se torne uma prática comum e amplamente adotada na indústria da construção.

Palavras-chave: impressão 3D; materiais naturais; construção civil.

Abstract

3D printing is a technology that can make structures more sustainable and personalized, as it reduces construction waste and enables the use of diverse materials in its composition, as well as providing opportunities for the elaboration of more creative projects. For this, this article aims to investigate the widespread adoption and success of 3D printing technology on a global scale, in parallel with the strategic incorporation of natural materials in this context. By carrying out an exploratory search in open and online scientific articles, publications were found that focused on information regarding additive manufacturing applied to civil construction, the technology that involves 3D printing and the application of natural materials in the project context. As a result, the research concluded that there are challenges and possibilities for 3D printing in architecture, a technology that can revolutionize the construction sector. Among the main challenges are scale, quality of materials, regulation and sustainability. However, it is evident that these barriers need to be overcome for 3D printing to become a common and widely adopted practice in the construction industry.

Keywords: 3D printing; natural materials; civil construction.

1. Introdução

Ao longo dos séculos, a arquitetura e a engenharia experimentaram inúmeras transformações, abrangendo mudanças estéticas, ideológicas e tecnológicas. É notório que os métodos construtivos também acompanharam essas mudanças, evoluindo de forma contínua. Desde o uso da madeira e da alvenaria até a introdução do concreto e do aço, as técnicas de construção têm se adaptado e progredido consistentemente.

Nesse contexto, nos anos recentes, a discussão em torno da aplicação da tecnologia de impressão 3D na arquitetura tem ganhado espaço. Ainda que de maneira incipiente, já é possível encontrar exemplos interessantes de como esse processo pode ser incorporado à produção arquitetônica.

Embora o debate em torno dessa tecnologia tenha se intensificado nos últimos cinco anos, é importante destacar que a impressão 3D não é uma inovação recente. Foi criada em 1986 por Charles Hull, marcando o advento do primeiro sistema de prototipagem rápida. Apesar de sua longa história, essa tecnologia permaneceu predominantemente associada à produção industrial por muito tempo.

Ao longo dos séculos passados, os métodos construtivos têm passado por uma evolução gradual, à medida que novos materiais e técnicas são introduzidos. Materiais como a alvenaria, o concreto e o aço, entre outros, revolucionaram parcialmente a maneira como as edificações são construídas. Nesse contexto, há um crescente debate sobre como a integração da tecnologia de impressão 3D poderá influenciar a forma como os projetos arquitetônicos são concebidos.

De acordo com Silva (2020), somente em 2007, a 3D Systems apresentou a primeira impressora 3D com um custo inferior a US\$10.000,00, embora essa tenha tido um sucesso comercial abaixo do esperado. Apesar disso, essa iniciativa abriu caminho para a introdução de impressoras mais acessíveis. Contudo, a primeira impressora de baixo custo somente surgiu em 2009, vendida como um kit baseado no projeto de impressora doméstica "RepRap", de código aberto.

Nesse contexto, a impressão 3D emerge como uma alternativa promissora na indústria da construção, possibilitando a fabricação automatizada de componentes construtivos sem custos adicionais e reduzindo desperdícios. Salman et. al (2021), mostram que a fabricação e instalação de formas, juntamente com os custos de mão de obra, representam aproximadamente dois terços do orçamento total da construção. Assim, ao reduzir esses custos por meio dessa tecnologia, é possível reduzir significativamente os gastos com a obra e minimizar os resíduos gerados.

Compostos cimentícios como concreto e argamassa são amplamente empregados em todo o mundo, no entanto, com os avanços tecnológicos, a construção convencional revelou suas limitações, tornando-se uma das áreas menos desenvolvidas em termos de tecnologia. Portanto, é crucial implementar mecanismos que visem à inovação, produtividade, eficiência e sustentabilidade. Atrelado a isso, é importante destacar que o uso da manufatura aditiva, traz economia e otimização do tempo de construção, no Brasil existem startups que já construíram uma casa impressa em 3D, com 66 m² com tempo de impressão de 48 horas.

A não utilização de formas e elementos de ancoragem, o menor consumo de recursos como mão-de-obra e energia, aumentam a produtividade contribuindo com a redução de desperdícios e sustentabilidade, já que o material será depositado somente no local previsto, além disso, é possível a utilização de materiais suplementares em substituição ao cimento, assim como a pesquisa de Silva (2023), que proporcionam a redução da emissão de CO_2 , portanto a utilização da impressão 3D em larga escala tem potencial sustentável, além do inovador.

A indústria da construção civil exerce um papel fundamental na formação do mundo moderno, porém está associada a impactos ambientais e sociais significativos. Abordar a sustentabilidade no setor da construção tornou-se cada vez mais crucial devido a esses impactos. Uma das principais preocupações ambientais é o elevado consumo de energia e as emissões de gases de efeito estufa relacionadas às atividades construtivas.

Desde a extração de matérias-primas até o transporte e as operações no canteiro de obras, todo o processo de construção contribui para as emissões de carbono. Além disso, a geração de resíduos de construção, a depleção de recursos naturais e a perturbação de ecossistemas são questões de destaque. Para mitigar esses impactos, a indústria da construção está migrando para práticas mais sustentáveis.

A construção sustentável busca minimizar a degradação ambiental, conservar recursos e promover o bem-estar social. A adoção de normas de construção verde, como Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), ferramenta que acelera a construção sustentável e Método de Avaliação Ambiental do Building Research Establishment (BREEAM), tem ganhado destaque globalmente. Essas normas incentivam o uso de materiais ecologicamente corretos, designs energeticamente eficientes e fontes de energia renovável BREEAM (2021); AMMAR (2020).

Além disso, empresas de construção estão cada vez mais adotando os princípios da economia circular ao reutilizar e reciclar materiais, reduzindo a geração de resíduos. Uma das soluções inovadoras que vem ganhando destaque na busca por uma construção mais sustentável é a tecnologia de impressão 3D, especialmente quando combinada com o uso de materiais naturais. A impressão 3D permite a criação de estruturas complexas com menor

desperdício de materiais e menor consumo de energia em comparação com os métodos de construção tradicionais.

No contexto da construção sustentável, a impressão 3D usando materiais naturais oferece várias vantagens. Uma delas é a redução da dependência de recursos não renováveis, como o cimento Portland, que é responsável por uma grande parte das emissões de dióxido de carbono na produção de concreto. Materiais como o barro, fibras vegetais e biomateriais podem ser usados como matéria-prima na impressão 3D, minimizando o impacto ambiental.

Além disso, a impressão 3D permite uma maior flexibilidade no design, o que significa que os edifícios podem ser adaptados às condições específicas do local e às necessidades dos usuários, reduzindo o desperdício de espaço e recursos. Essa tecnologia também pode ser empregada na recuperação de áreas degradadas, usando materiais naturais localmente disponíveis para reconstrução.

No entanto, desafios como parâmetros de impressão, interação entre os materiais para misturas, certificações de segurança e a integração de tecnologias tradicionais com a impressão 3D precisam ser superados para garantir que essas soluções sejam eficazes e sustentáveis em longo prazo. Portanto o estudo a respeito de soluções projetuais que englobam essa tecnologia de manufatura aditiva se faz importante e necessário.

A combinação da impressão 3D para a construção civil com o uso de materiais naturais suplementares ao cimento se torna uma abordagem promissora para enfrentar os desafios da sustentabilidade no canteiro de obras, de forma a além de reduzir impactos ambientais, abrir novas possibilidades criativas e eficientes para a criação de ambientes construídos mais equilibrados e em harmonia com o meio ambiente, evidenciando a necessidade de novas práticas construtivas com materiais eco-friendly.

2. Procedimentos Metodológicos

O propósito central deste estudo reside na realização de uma busca exploratória meticulosa, com o objetivo de investigar a ampla adoção e sucesso da tecnologia de impressão 3D em escala global, em paralelo com a incorporação estratégica de materiais naturais nesse contexto. O escopo da pesquisa foi delineado para aprofundar nossa compreensão das realizações e aplicações efetivas da impressão 3D em diferentes âmbitos ao redor do mundo, em conjunto com as vantagens e desafios intrínsecos à utilização de materiais naturais nesse domínio tecnológico.

Nesse contexto, o objetivo técnico do estudo é elucidar os casos de sucesso em que a impressão 3D tem demonstrado seu potencial transformador em diversos setores, enquanto também examina a viabilidade e os benefícios da utilização de materiais naturais como alternativas conscientes e sustentáveis em processos de impressão 3D. A investigação técnica detalhada não apenas enfoca a eficácia dos produtos finais resultantes, mas também considera os aspectos técnicos, econômicos e ambientais envolvidos.

Ao final dessa busca exploratória, almejamos oferecer uma visão técnica abrangente e embasada, que inspire a contínua evolução e inovação na utilização da impressão 3D em conjunto com materiais naturais, contribuindo para a expansão do conhecimento técnico-científico nessa interface promissora entre tecnologia e sustentabilidade.

3. Referenciais em projetos de arquitetura com impressão 3D

3.1. Manufatura Aditiva aplicada na Construção Civil e sustentabilidade

A impressão 3D tem modificado a indústria de construção civil pois ao mesmo tempo em que se ganha em complexidade das estruturas reduz-se o tempo de construção em relação às técnicas tradicionais. A análise do tempo de impressão tem sido muitas vezes confundido com o tempo de conclusão da edificação. Como as técnicas de impressão têm sido desenvolvidas para produção de sub-sistemas, como os elementos de vedação em paredes para impressão total ou em módulos, o tempo de impressão das vedações têm sido divulgados como tempos de entrega da edificação completa (ALMONANI, 2023).

Este tempo envolve as pavimentações, revestimentos, pinturas, colocação de esquadrias, instalação de coberturas, execução de impermeabilizações, instalações hidráulicas, sanitárias, elétricas e todos sub-sistemas necessários ao funcionamento da edificação, que é maior do que o tempo de impressão. O orçamento para a conclusão de uma edificação impressa deve analisar o volume de produção, disponibilidade de equipamentos e peças pré-fabricadas ou produzidas in loco.

Fatores como compra ou aluguel do equipamento, que devem se configurar como custos fixos ou variáveis, energia, custo de operação, calibragem do equipamento devem elevar os custos e modificar o perfil dessa estrutura dos setores de construção do Brasil, que tradicionalmente, em função dos baixos níveis de industrialização, possuem valores variáveis. Com a impressão 3D esses custos passam a ser essencialmente fixos e devem assumir uma proporção bem elevada em relação aos custos variáveis (dos materiais, por exemplo).

A impressão 3D tem potencial para ser uma opção sustentável. O nível de sustentabilidade depende não só dos itens apontados anteriormente, como custo e prazo, questões intrinsecamente econômicas, mas do tipo de equipamento e modelo de impressão a ser utilizado que definirá o consumo de energia, emissões de CO_2 e impactos gerados como ruídos, vibrações e emissões de partículas ao ar durante o processo de impressão.

Sufrerá influência da necessidade de complementos, da geração de resíduos, do uso materiais naturais como base para a construção ou dos impactos ambientais associados aos materiais base da impressão em fatores como reciclabilidade e incorporação de reciclados, toxicidade, emissões, energia incorporada, uso de água, enfim, aspectos associados ao ciclo de vida do material que implicam na dimensão ambiental da sustentabilidade.

Outra reflexão precisa ser conduzida no que se refere aos aspectos socioculturais, tendo em vista a inovação da construção. No Brasil, as obras se pautam em um tecnologia construtiva baseada em concreto armado moldado in loco e alvenarias/paredes como elementos de vedação. Com uma série de características já evidenciadas na literatura técnica da área, como rotatividade da mão, elevado desperdício, características artesanais, nômades e únicas, é ainda um sistema que gera muitos empregos, sendo um dos grandes responsáveis pelo PIB nacional.

Dessa forma, questões associadas à geração de emprego (visto que o sistema vigente absorve a mão de obra que não consegue colocação em outros setores), nível de escolaridade,

domínio tecnológico e outros fatores culturais, como de modificações e flexibilização de ambientes precisam ser considerados, levando em conta que, grande parte dos casos de aplicação da impressão 3D foquem na execução de partes da estrutura total, percebe-se uma redução do uso de mão de obra, ainda que os demais componentes estejam sendo pensados para seguir as lógicas já vigentes no mercado.

Além da logística e impacto social da aplicação da manufatura aditiva na construção civil, os materiais e a interação entre eles também é alvo de pesquisas em todo o mundo. O uso de materiais naturais, como terra e madeira, é uma tendência crescente na construção civil, pois esses materiais são renováveis, abundantes e de baixo impacto ambiental. A impressão 3D pode ser uma técnica eficiente para incorporar esses materiais em projetos de construção.

A utilização de impressão 3D pode trazer inúmeras vantagens, como a redução de custos de construção, diminuição do tempo de construção e aumento da segurança das estruturas. Além disso, a utilização de materiais naturais pode trazer benefícios adicionais, como a melhoria da qualidade do ar interno, diminuição da emissão de gases de efeito estufa e melhoria da eficiência energética das estruturas.

Além da terra, a madeira também pode ser usada na impressão 3D, até mesmo como cobertura e por ser leve, pode apoiar-se na estrutura impressa existente. Além disso, a madeira é um material de construção naturalmente isolante e durável, que pode ser facilmente processado para ser usado como base na impressão 3D. A utilização de madeira na impressão 3D pode permitir a construção de estruturas de alta qualidade e resistentes à intempéries, que podem ser facilmente desmontadas e reaproveitadas em outros projetos.

A utilização de impressão 3D e materiais naturais na construção civil pode trazer inúmeros benefícios sociais e ambientais. Além disso, a utilização dessas técnicas pode ajudar a melhorar a qualidade de vida proporcionando- um ambiente seguro e confortável para viver. No entanto, para que essa técnica seja utilizada com sucesso, é necessário que haja investimentos em pesquisas, testes e desenvolvimento de novas tecnologias.

Também é preciso que haja uma regulamentação específica para a utilização de impressão 3D e materiais naturais na construção civil, garantindo que os projetos sejam seguros, eficientes e sustentáveis. A impressão 3D na construção é uma área relativamente nova e em constante evolução, mas já existem algumas referências importantes de projetos bem-sucedidos utilizando essa tecnologia.

3.2. Tecnologia para Impressão 3D

A impressão 3D é um modelo de tecnologia de manufatura aditiva (Additive Manufacturing - AM), que é um processo que opera diversas ferramentas) desenvolvida em 1980, sendo o primeiro maquinário produzido pela empresa 3D Systems, que hoje é referência neste mercado (BAZ; AOUAD; REMOND, 2020), com primeiro processo chamado Estereolitografia (Stereolithography, SLA) (BAZ; AOUAD; REMOND, 2020); (SANJAYAN et al., 2018) e (WU; WANG; WANG, 2016a). De acordo com Jingchuan et. al. (2019), as principais tecnologias de impressão 3D correspondem a Contour Crafting (CC), Concrete Printing (CP) e D-Shape.

Assim como em qualquer tecnologia de longa trajetória, diversas técnicas de impressão 3D foram desenvolvidas ao longo das últimas três décadas. Com isso em mente, é certo afirmar que no mercado atual é possível encontrar uma variedade de modelos que utilizam técnicas diversas, variando em preço e qualidade de impressão. Entretanto, duas formas de impressão se destacam e são aplicáveis à construção civil: a FDM (Fused Deposition Modeling, ou Modelagem por Fusão e Deposição) e a SLA (Stereolithography). No Quadro 1 é possível visualizar as tecnologias citadas e suas principais características.

Quadro 1 - Tecnologias de impressão 3D

FDM	SLA	SLS
<p>O material é extrudado por um bocal montado em pórtico, guindaste ou braço robótico, que imprime camada por camada da estrutura, fazendo com que o (FDM) seja um dos mais indicados para a construção.</p>	<p>Tecnologia de rápida execução que usa uma resina líquida sobre a qual são aplicados raios ultravioleta, de forma a criar camada sobre camada. O laser então faz com que a resina cure, aderindo a camada inferior e assim construindo o objeto 3D.</p>	<p>Tecnologia que utiliza um laser para fundir pequenas partículas, de forma que elas se juntem umas às outras. Estas partículas podem ser de plástico, cerâmica, metal etc.</p>

Fonte: Autores.

Como mencionado previamente, ao longo dos séculos passados, as técnicas construtivas foram progressivamente aprimoradas. Materiais como madeira, concreto e aço são meros exemplos de como novos métodos de construção continuam a ser desenvolvidos de maneira constante. Tendo esse contexto em mente, é pertinente destacar a tecnologia de impressão 3D como uma das inovações com um dos maiores potenciais para transformar a maneira como as edificações são concebidas e executadas.

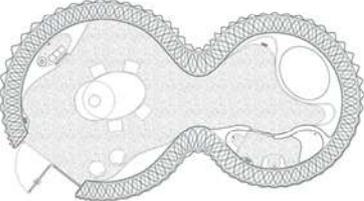
Nesse sentido, para uma compreensão mais abrangente sobre a aplicabilidade da tecnologia de impressão 3D na arquitetura, torna-se essencial a busca e a análise de estudos de caso nos quais essa tecnologia foi implementada de maneira bem-sucedida.

3.3. Principais empresas

No quadro 2 é possível observar as principais empresas, que são referências em impressão 3D na construção civil.



Quadro 2 - Empresas referência em impressão 3D na construção civil

<p>WinSunDecoration Design Engineering Co</p> 	<p>Apis Cor</p> 	<p>ICON 3D</p> 
<p>A empresa chinesa WinSun é uma das pioneiras no uso de impressão 3D, com pontes, vilas e prédios de vários andares usando impressão 3D, com destaque para edifício com 5 pavimentos e unidades para isolamento de COVID 19 com uso de material reciclado (SMART CONSTRUCTION, 2020).</p>	<p>A empresa russa Apis Cor é outra referência em impressão 3D na construção civil. Em 2017, a empresa construiu uma casa de 38 metros quadrados em apenas 24 horas, usando uma impressora 3D móvel. Desde então, a Apis Cor tem construído casas e edifícios de vários andares em todo o mundo, incluindo projetos na Europa, África e América do Sul (Arch Daily, 2021).</p>	<p>A ICON tem construído casas e edifícios em todo o mundo, incluindo projetos de habitação social nos EUA e na América Latina, em 2018, a ICON, uma startup de construção com impressora 3D, construiu a primeira casa habitável nos EUA (Arch Daily, 2022) .</p>
<p>COBOD</p> 	<p>Tecnologia WASP, Mario Cucinella</p> 	<p>Total Kustom</p> 
<p>A empresa desenvolveu uma impressora 3D móvel capaz de construir estruturas de até três andares de altura. A COBOD tem realizado projetos em todo o mundo, incluindo uma ponte impressa em 3D na Holanda e uma casa em Dubai (The Game, 2023).</p>	<p>Modelo de casa de argila impressa em 3D, idealizada pelo arquiteto Mario Cucinella. A massa utilizada para as estruturas seria um composto de terra, água, fibras de cascas de arroz e aglutinante - menos de 5%, em relação ao que se usa normalmente em outras construções (TAGLIANI, 2022).</p>	<p>A empresa foi a primeira no mundo a criar e desenvolver a primeira impressora móvel 3D de concreto para impressão no local, e foi a primeira no mundo a imprimir um edifício comercial totalmente operacional, impresso como uma unidade sólida e de peça única (TOTAL KUSTON, 2023).</p>

Fonte: Autores.

3.4. Principais Materiais

Um dos principais pilares para o sucesso da impressão 3D se constituem dos materiais que irão compor a tinta (material cimentício) da impressão. Para impressão à base de cimento, este ligante deve constituir uma pasta com fluidez adequada, extrudabilidade e trabalhabilidade para atender aos requisitos do processo de impressão (BUSWELL et al., 2020).

Porém, além do cimento, há vários materiais que podem ser utilizados para compor a matéria prima de impressão. Pode-se destacar:

- plástico - diferentes tipos de plásticos podem ser empregados, sendo o ABS e o PLA os mais comuns. Ambos são termoplásticos, ou seja, podem ser moldados após o

aquecimento, e sua capacidade de derreter e solidificar diversas vezes possibilita seu reaproveitamento. O ABS, presente em produtos industrializados, é mais resistente, flexível e suporta altas temperaturas, sendo preferível para peças que demandam conexões de plástico. O PLA, mais ecológico por ser originado de plantas, como o milho, é biodegradável e adequado para impressões mais rápidas, embora seja menos resistente ao calor;

- metal: há um número considerável de impressoras no mercado capazes de criar peças metálicas, frequentemente usando alumínio e aço inoxidável. Materiais nobres como ouro e prata também podem ser incorporados, permitindo a produção direta de peças nesses materiais. A startup MX3D introduziu uma técnica inovadora para imprimir aço sem necessidade de suportes, e o titânio é outro metal já utilizado em pó para a impressão, e
- papel: uma impressora notável é a da Mcor, que emprega folhas de papel A4, cola à base de água e tintas à base de água para criar objetos coloridos e ecológicos. Ideal para ambientes educacionais, como escolas e universidades, para produção de peças de estudo e protótipos.

Neste contexto, materiais naturais sustentáveis vão ganhando cada vez mais espaço, de acordo com Moretti (2021), fundador da empresa WASP - empresa que faz uso de materiais sustentáveis aplicados à impressão 3D, é possível construir uma casa bonita, saudável e sustentável com uma máquina, usando a matéria-prima local.

Um modelo de casa eco-sustentável também se destaca no cenário da manufatura aditiva com a utilização do solo (terra) como principal ligante da mistura constituinte e também de resíduos naturais locais, o projeto foi chamado de Gaia e corresponde a uma casa estruturada por paredes impressas feitas com 25% de solo retirado do local (30% de argila, 40% de lodo e 30% de areia), 40% de palha de arroz picada, 25% de casca de arroz e 10% de cal hidratada.

O projeto é um exemplo de bioarquitetura, a casa é ambientalmente sustentável e bioclimática. As esquadrias foram projetadas para otimizar a luz solar e o telhado foi feito de madeira com fundações de concreto impressas em 3D, todo o sistema foi pensado para criar energia térmica para a casa, o esquema estrutural deve fornecer ventilação natural e isolamento termoacústico.

3.5. Projetos desenvolvidos em impressão 3D

Existem muitos projetos em destaque na arquitetura feitos com uma impressora 3D, sobretudo devido a variedade de maquinários e formas que são possíveis de serem modeladas. As misturas a serem utilizadas neste processo também influencia diretamente na aparência e no caráter e aspectos construtivos.

O projeto inspirado em abelhas foi o modelo para a obra da empresa italiana Tecla. A casa possui uma área de cerca de 60 metros quadrados, sendo composta por uma área de estar com cozinha e uma sala noturna, onde se encontra o banheiro e a área de serviço. Cada unidade gráfica possui uma área de impressão de 50 metros quadrados, o que permite construir módulos habitacionais independentes em poucos dias, segundo os idealizadores. A tecnologia

é inspirada em uma vespa porque constrói seus ninhos com argila em forma de ânfora ou vasilhame.

A mobília foi parcialmente impressa em solo local e integrada à estrutura de terra crua, além de ser parcialmente projetada para ser reciclada ou reutilizada. A unidade básica de impressão deste sistema utiliza simultaneamente dois braços de impressora sincronizados e controlados por um programa de computador, que otimiza seus movimentos, evita choques e garante que funcionem de forma ágil, na impressão, foram empregados 150 km de extrusão, ou seja, material moldado por pressão, e 60 metros cúbicos de materiais naturais, com consumo médio inferior a 6 quilowatts (kW) de eletricidade.

Na Figura 1 é possível observar a geometria e construção desta edificação, vale destacar que o tempo de construção foi de 8 dias com o uso de impressoras com 12 metros de altura com argila e fibras naturais.



Figura 1: Casas inspiradas em abelhas impressas com mega impressora à base de terra. Adaptado de Mega Game (2023).

Além do projeto de impressão 3D inspirado nas abelhas, existem outros projetos que podem ser exemplos para este artigo científico e que trazem grande enriquecimento acerca do tema, principalmente com o leque de possibilidades evidenciadas com o uso dessa tecnologia e dos materiais aplicáveis.

No Quadro 3 é possível observar os projetos em destaque realizados pelas principais empresas com o uso da tecnologia de impressão 3D.

Quadro 3 - Principais obras produzidas com impressora 3D

Primeiro conjunto habitacional	Ponte impressa em 3D	Conjunto habitacional - Austin
 <p>WinSun - A impressão da primeira casa teria demorado de 5 a 7 dias, considerando apenas as paredes. Em um vídeo o tempo de impressão divulgado foi de 10 casas em 24 horas, considerando o uso de 4 impressoras (Smart Construction, 2020).</p>	 <p>Startup holandesa MX3D - A empresa criou uma tecnologia inovadora que permite a impressão de peças em metal em qualquer forma desejada, sem necessidade de suportes (Arch Daily, 2022).</p>	 <p>Icon - A impressora utilizada na produção possui cerca de 10 metros de comprimento. A máquina libera camadas de material para erguer paredes de pouco mais de 2 metros de altura e 8 metros de comprimento, que podem ser concluídas em até 24 horas (Arch Daily, 2022).</p>
Casa de dois andares nos EUA	Habitação sustentável	Casa TOVA
 <p>COBOD - A construção ocorre desde setembro do ano passado e está sediada no Texas. A casa terá 372 metros quadrados de área construída. O projeto mostra as possibilidades da tecnologia de impressão 3D, customização em massa e soluções de design que integram métodos convencionais de construção. É a primeira vez que um edifício com dois andares é desenvolvido inteiramente com essa tecnologia (COBOD, 2023).</p>	 <p>TECLA - modelo inovador de habitação circular que reúne investigação sobre práticas de construção vernacular, o estudo de princípios bioclimáticos e a utilização de materiais naturais e locais. É um projeto com emissões quase nulas: o seu invólucro e a utilização de um material inteiramente local permite a redução de resíduos e entulhos.</p>	 <p>Protótipo de casa sustentável construído a partir do uso de materiais naturais, junto com o recurso da impressão 3D. Os principais materiais utilizados são terra e água, extraídos do próprio local, acrescidos de enzimas e aditivos (SUSTENTARQUI, 2022).</p>

Fonte: Autores.

4. Resultados e discussões

Com a pesquisa, foi possível destacar que a impressão 3D tem desempenhado um papel revolucionário na construção civil, trazendo consigo uma gama diversificada de inovações em termos de materiais, tecnologia de impressão, tipos de edificações e considerações financeiras e sustentabilidade. Pesquisadores em todo o mundo dirigem esforços para a investigação de misturas e materiais promissores a serem empregados. Técnicas e projetos inovadores e sustentáveis.

Os materiais mais utilizados neste sistema construtivo são compostos por: Cimento - material mais comumente utilizado na impressão 3D para construção civil. A técnica de deposição de cimento camada por camada permite a criação de estruturas sólidas e duráveis; Plásticos - Plásticos como o PLA e o ABS são empregados em impressão 3D, especialmente para prototipagem rápida e peças não estruturais. O PLA, originado de plantas, é conhecido por sua eco-amigabilidade; e metais - alumínio, aço inoxidável e até mesmo metais nobres como ouro e prata podem ser utilizados em impressão 3D na construção, permitindo a criação de estruturas metálicas robustas.

Quanto aos tipos de edificações, pode-se destacar com esta pesquisa:

- casas e edifícios: A impressão 3D tem sido usada para construir casas e edifícios de vários tamanhos e designs. Isso inclui casas para habitação, edifícios de escritórios e instalações industriais;
- ponte: Algumas empresas têm explorado a impressão 3D para criar pontes de pedestres e veículos, demonstrando a capacidade de construir infraestruturas duráveis e esteticamente atraentes, e
- habitação acessível e de emergência: A tecnologia de impressão 3D é usada para criar soluções habitacionais acessíveis e para fornecer abrigo de emergência após desastres naturais.

Os preços, prazos e custos na impressão 3D para construção civil variam de acordo com fatores como:

- escala do projeto: Projetos de maior escala geralmente têm custos mais elevados, mas podem se beneficiar de economias de escala;
- tamanho da impressora: O tamanho da impressora 3D utilizada influencia diretamente o prazo de construção e os custos, uma vez que determina as dimensões máximas das peças impressas;
- material utilizado: Os custos dos materiais de impressão variam dependendo do tipo e da quantidade necessária para o projeto, e
- localização e logística: O acesso ao local de construção e a logística de transporte dos equipamentos de impressão também afetam os custos e prazos.

Portanto, a impressão 3D está revolucionando a construção civil com uma variedade de materiais e técnicas de impressão. Desde casas até pontes, essa tecnologia oferece soluções inovadoras para a indústria da construção, embora os custos e prazos variem dependendo da complexidade do projeto e dos recursos disponíveis.

Deste modo, com o Quadro 4 é possível comparar os principais projetos, custos e tecnologias que estão sendo utilizados em todo o mundo.

Quadro 3 - Principais projetos habitacionais de impressão 3D das empresas no mundo

Empresa	Projeto	Custo	Estrutura entregue	Prazo	Materiais	Tecnologia de Impressão
1. WinSun	Casa - 40 m ²	R\$ 10.500,00 /casa	Paredes impressas	24 horas	Material cimentício e fibra de vidro	Pórtico: Camda por camada
2. Apis Cor	Casa - 37 m ²	R\$ 31.500,00	Casa completa	25 horas	Material cimentício	Pórtico: Camda por camada
3. Icon 3D	Casa - 60 m ²	R\$ 20.000,00 a R\$ 50.000,00	Casa completa	12 horas	Material cimentício	Pórtico: Camda por camada
4. Cobod	Casa ecológica - 50 m ²		Casa completa - Ecológica	200 horas	Materiais recicláveis e locais - terra	Wasp - Impressão modular com braço robótico
5. Total Kustom	Casa - 100 m ²	R\$ 10.000,00 /casa	Paredes impressas	48 horas	Material cimentício e suplementares	Concrete Printing - braço robótico

Fonte: Autores.

5. Considerações Finais

A utilização da impressão 3D na arquitetura é um campo em constante evolução, com inúmeras possibilidades e desafios à frente. O potencial de transformação que essa tecnologia oferece para o setor é imenso, desde a otimização dos processos construtivos até a criação de estruturas mais sustentáveis e personalizadas. No entanto, apesar dos avanços notáveis, ainda há barreiras a serem superadas antes que a impressão 3D se torne uma prática comum e amplamente adotada na indústria da construção.

Um dos principais desafios que a tecnologia de impressão 3D enfrenta é a escala. Embora tenham sido alcançados progressos notáveis na impressão de pequenas estruturas e elementos arquitetônicos, a construção de edifícios de grande porte ainda é um desafio complexo. A escala traz consigo uma série de considerações, desde a logística de transporte dos equipamentos de impressão até a eficiência no uso de materiais, tempo e energia.

Além disso, a qualidade dos materiais utilizados na impressão 3D é um ponto crucial. A durabilidade, resistência e segurança das estruturas impressas são fatores críticos que precisam ser garantidos para que as edificações sejam seguras e confiáveis a longo prazo. A pesquisa contínua na área de materiais é fundamental para aprimorar as características dos materiais de impressão e garantir que atendam aos padrões de construção.

Outro desafio é a regulamentação e normatização. A indústria da construção é altamente regulamentada, com padrões de segurança rigorosos que precisam ser seguidos para garantir a proteção dos ocupantes das edificações. A introdução da impressão 3D requer a revisão e adaptação das normas existentes para acomodar as particularidades dessa tecnologia. É necessário um esforço conjunto entre profissionais da área, autoridades reguladoras e especialistas em tecnologia para estabelecer diretrizes claras e abrangentes.

Além disso, a questão da sustentabilidade também é fundamental. Embora a impressão 3D possa reduzir o desperdício de materiais em comparação com os métodos tradicionais de construção, é importante considerar o ciclo de vida completo das estruturas e os impactos ambientais de longo prazo. A seleção de materiais e a eficiência energética durante a



impressão são aspectos cruciais para garantir que a tecnologia contribua para a construção de edifícios mais sustentáveis.

No entanto, apesar dos desafios, os exemplos de projetos bem-sucedidos de impressão 3D na arquitetura demonstram o potencial e a promessa dessa tecnologia. A capacidade de imprimir edifícios de formas complexas, integrar funcionalidades específicas e criar estruturas adaptadas ao meio ambiente local são conquistas notáveis que indicam um futuro emocionante para a indústria da construção.

À medida que a tecnologia de impressão 3D continua a evoluir e amadurecer, é provável que mais inovações sejam alcançadas. A colaboração entre arquitetos, engenheiros, cientistas de materiais e especialistas em tecnologia será essencial para superar os desafios restantes e explorar completamente o potencial dessa tecnologia revolucionária. A impressão 3D tem o poder de redefinir a maneira como vemos a construção e a arquitetura, oferecendo novas perspectivas e possibilidades para a criação de ambientes construídos mais eficientes, sustentáveis e inspiradores.

Referências

ALMONANI, M. A., AL-ABABNEH, N., ABDALLA, K., SHBEEB, N. I., PANTOUVAKIS, J. P., & LAGAROS, N. D. Selecting the Best 3D Concrete Printing Technology for Refugee Camp's Shelter Construction Using Analytical Hierarchy Process: The Case of Syrian Refugees in Jordan. **Buildings**, v. 13, n. 7, p. 1813, 2023.

AMMAR A., DINA H. Energy efficient 3D printed buildings: Material and techniques selection worldwide study, *Journal of Building Engineering*, Volume 30, 2020, 101286, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101286>.

BUSWELL, R. et al. Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction. *Automation in construction*, Elsevier B.V, Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 224–231, 2020. ISSN 0926-5805.

CARR, B. **Exposing 5 LIES about 3D Printed Concrete Homes**. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=sz1LM9kwRLY>. Acesso em: 05 ago. 2023.

DAILY, A. **Vila de casas impressas em 3D é construída para sem-tetos nos EUA**. 2021. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/960149/vila-de-casas-impressas-em-3d-e-construida-para-sem-tetos-nos-eua>. Acesso em: 12 set. 2023.

SILVA, L.F. Materiais cimentícios suplementares desenvolvidos com metacaulim e HPMC para impressão 3D: influência nos aspectos de extrudabilidade e construtibilidade. Londrina, PR: Tese de Doutorado (UEL), 2023.

SILVA, A. R. F. **Fabricação Aditiva no Design de Moda**. 2020. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Design de Moda, Universidade Beira Interior, Covilhã, 2020. Disponível em: https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/11635/1/7994_17142.pdf. Acesso em: 04 set. 2023.

SALMAN, N.M. et al. Importance and potential of cellulosic materials and derivatives in extrusion-based 3d concrete printing (3dcp): Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, v.291, p.123281, 2021. ISSN 0950-0618. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821010412>.

SMART CONSTRUCTION (Brasil). Arq + Smart Construction. **Empresa chinesa cria casas impressas em 3D para isolamento**. 2020. Disponível em:



<https://www.arqsmartconstruction.com/projetos/empresa-chinesa-cria-casas-impresas-em-3d-para-isolamento>. Acesso em: 07 set. 2023.

SUSTENTARQUI (Barcelona). **Primeira casa de terra impressa em 3D na Espanha alia tecnologia à bioconstrução.** 2022. Disponível em: <https://sustentarqui.com.br/primeira-casa-de-terra-imprensa-em-3d-na-espanha/>. Acesso em: 27 ago. 2023.

TAGLIANI, Simone. **3 exemplos incríveis de projetos de casas impressas em 3D.** 2023. Disponível em: <https://engenharia360.com/exemplos-de-casas-impresas-em-3d/>. Acesso em: 16 jan. 2023.

THE GAME (Campinas - Sp). **Megaimpressora Constrói Casa De 60 M² Com Terra Crua Em 8 Dias.** 2021. Disponível em: <https://thegamecollective.com.br/blogs/design/megaimpressora-constroi-casa-de-60-m-com-terra-crua-em-8-dias>. Acesso em: 15 ago. 2023.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.8400500/2023-00”. “This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 88887.8400500/2023-00”