



INSTITUTO FEDERAL
GOIÁS
Câmpus Anápolis

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA
MOBILIDADE

APLICAÇÃO E DESAFIOS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM
PROTOCOLO DE REVISÃO SISTEMÁTICA

PEDRO DANIEL ALVES FERREIRA TEIXEIRA

ORIENTADORA: Profa. Esp. Dayane Lopes Marques Santana

PUBLICAÇÃO:

ANÁPOLIS
2024

PEDRO DANIEL ALVES FERREIRA TEIXEIRA

**APLICAÇÃO E DESAFIOS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM
PROTOCOLO DE REVISÃO SISTEMÁTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Civil da
Mobilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Goiás – Campus Anápolis, como requisito
parcial para conclusão de curso.

Orientadora: Profa. Esp. Dayane Lopes Marques Santana

ANÁPOLIS, 2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Teixeira, Pedro Daniel Alves Ferreira.

T266a Aplicação e desafios da impressão 3D na construção civil: um protocolo de revisão sistemática./ Pedro Daniel Alves Ferreira Teixeira.
– Anápolis: IFG, 2024.
63 f. il. color.

Orientadora: Prof^a. Dayane Lopes Marques Santana.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Anápolis – Bacharelado em Engenharia Civil da Mobilidade, 2024.

1. Construção civil. 2. impressão 3D. 3. sustentabilidade.

I. Santana, Dayane Lopes Marques (orient.).

II. Título.

CDD 624



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ANÁPOLIS

ATA Nº 10/2024.1

ATA DA SESSÃO PÚBLICA DE APRESENTAÇÃO E DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

No 30º dia do mês de setembro do ano de dois mil e vinte e quatro, às 16:10 horas, no IFG-Câmpus Anápolis, Sala T-601- Bloco 600, foi realizada a sessão pública de apresentação e defesa do Trabalho de Conclusão de Curso do Graduando Pedro Daniel Alves Ferreira Teixeira (matrícula 20181060130140) do curso de Engenharia Civil da Mobilidade. A banca foi composta pelos seguintes membros: Dayane Lopes Marques Santana, Lucas de Oliveira Zúñiga e Helen Oliveira Tenório, sob a presidência do primeiro. O trabalho de conclusão de curso tem como título **"VIABILIDADE DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM PROTOCOLO DE REVISÃO SISTEMÁTICA"**, da área de Construção Civil, sob orientação da Profa. Dayane Lopes Marques Santana. Após a apresentação, tendo sido o autor arguido pela Banca Examinadora, a nota obtida foi 100,0 (Cem pontos) e o Trabalho de Conclusão de Curso foi considerado (X) aprovado () aprovado com correções () reprovado pela banca examinadora.

Encerrou-se a presente sessão às 17 horas e 30 minutos. Eu, Profa. Dayane Lopes Marques Santana, dato e assino a presente ata que segue assinada por todos os membros da Banca e pelo graduando.

Profa. Dayane Lopes Marques Santana

(Assinado eletronicamente)

Prof. Lucas de Oliveira Zúñiga

(Assinado eletronicamente)

Profa. Helen Oliveira Tenório

(Membro externo)

Documento assinado digitalmente



HELEN OLIVEIRA TENORIO

Data: 11/10/2024 09:22:31-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pedro Daniel Alves Ferreira Teixeira

(Graduando)

(Assinado eletronicamente)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Pedro Daniel Alves Ferreira Teixeira**, 20181060130140 - Discente, em 09/10/2024 18:20:54.
- **Lucas de Oliveira Zuniga**, PROF ENS BAS TEC TECNOLOGICO-SUBSTITUTO, em 09/10/2024 15:50:23.
- **Dayane Lopes Marques Santana**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/10/2024 15:25:16.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/10/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 574172

Código de Autenticação: 0c485344b1



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Pedro Ludovico, s/ nº, None, Reny Cury, ANÁPOLIS / GO, CEP 75131-457
(62) 3703-3373 (ramal: 3373)



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Pedro Daniel Alves Ferreira Teixeira

Matrícula: 20181060130140

Título do Trabalho: APLICAÇÃO E DESAFIOS DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM PROTOCOLO DE REVISÃO SISTEMÁTICA

Autorização - Marque uma das opções

1. (x) Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. () Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. () Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- () O documento está sujeito a registro de patente.
() O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
() Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Anápolis, 30/09/2024.

Local

Data



Documento assinado digitalmente
PEDRO DANIEL ALVES FERREIRA TEIXEIRA
Data: 28/10/2024 20:02:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

DEDICATÓRIA:

Dedico este trabalho à minha família, que sempre acreditou no meu potencial e me ofereceu apoio incondicional. Aos meus pais, pelo amor, paciência e por me inspirarem a nunca desistir. Este é o fruto de todo o incentivo e dedicação de vocês.

RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) avalia a viabilidade da impressão 3D na construção civil, destacando seu impacto em termos de custo, tempo, sustentabilidade e durabilidade. A pesquisa, conduzida por meio de uma revisão sistemática, revela que a impressão 3D pode transformar o setor ao reduzir significativamente os custos e o tempo de construção, além de minimizar o desperdício de materiais. A tecnologia permite a criação de estruturas complexas com alta precisão e oferece soluções sustentáveis, como o uso de materiais reciclados e a redução da pegada ambiental. Comparada aos métodos tradicionais, a impressão 3D pode reduzir em até 60% os custos e 70% o tempo de construção, além de proporcionar economia a longo prazo devido à durabilidade das estruturas. No entanto, a implementação em larga escala enfrenta barreiras, como a falta de normatizações, o alto custo inicial dos equipamentos e a necessidade de adaptação de profissionais e processos tradicionais. Questões sobre a durabilidade e a qualidade das construções impressas em 3D também precisam ser melhor investigadas, especialmente em relação à resistência a fatores ambientais e à adesão entre camadas. O estudo sugere que, com o desenvolvimento contínuo de tecnologias e a criação de padrões regulatórios, a impressão 3D tem o potencial de se consolidar no futuro da construção civil, oferecendo soluções inovadoras e sustentáveis. Apesar dos desafios, a adoção crescente da manufatura aditiva no setor demonstra que a tecnologia pode ser uma alternativa viável para atender à demanda por construções mais rápidas, econômicas e ecológicas, contribuindo significativamente para o avanço da indústria da construção civil.

Palavras-chave: Construção Civil. Impressão 3D. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This Course Completion Work (TCC) evaluates the viability of 3D printing in construction, highlighting its impact in terms of cost, time, sustainability and durability. The research, conducted through a systematic review, reveals that 3D printing can transform the sector by significantly reducing costs and construction time, as well as minimizing material waste. The technology allows the creation of complex structures with high precision and offers sustainable solutions, such as the use of recycled materials and the reduction of the environmental footprint. Compared to traditional methods, 3D printing can reduce costs by up to 60% and construction time by 70%, in addition to providing long-term savings due to the durability of the structures. However, large-scale implementation faces barriers, such as the lack of standards, the high initial cost of equipment and the need to adapt professionals and traditional processes. Questions about the durability and quality of 3D printed constructions also need to be further investigated, especially in relation to resistance to environmental factors and adhesion between layers. The study suggests that, with the continuous development of technologies and the creation of regulatory standards, 3D printing has the potential to consolidate itself in the future of civil construction, offering innovative and sustainable solutions. Despite the challenges, the growing adoption of additive manufacturing in the sector demonstrates that the technology can be a viable alternative to meet the demand for faster, more economical and ecological construction, significantly contributing to the advancement of the construction industry.

Keywords: Civil Construction. 3D printing. Sustainability.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
BIM	Building Information Modeling
C3DP	Concrete 3D Printing
CAD	Computer Aided Design
FDM	Modelagem por fusão e deposição
GO	Goiás
IA	Inteligência Artificial
IAAC	Institute for Advanced Architecture of Catalonia
IoT	Internet das Coisas
NASA	Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço
PLA	Ácido Polilático
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização seletiva a laser
STL	Standard Tessellation Language (Linguagem de mosaico padrão)
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UV	Ultravioleta

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeira casa impressa em 3D.....	14
Figura 2 - Primeira ponte em Impressão 3D	15
Figura 3 - Casa feita em impressão 3D pela ICON	46
Figura 4 - Interior de casa por impressão 3D	46
Figura 5 - Impressora ICON extrudando concreto	47
Figura 6 - Casa impressa em 3D no Texas, EUA.....	47
Figura 7 - Casas em bairro por impressão 3D	48
Figura 8 - Casas ecológicas impressas em 3D pela WASP na Itália.....	48
Figura 9 - Casas em impressão 3D para pessoas de baixa renda.....	49
Figura 10 - Construção do Dubai Future Foundation com impressão 3D.....	49
Figura 11 - Engenheiros responsáveis pelo empreendimento ainda na fase construtiva	50
Figura 12 - Paredes estruturais finalizadas	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação de Custos entre Impressão 3D e Métodos Tradicionais	17
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
1.1 QUESTÃO NORTEADORA	7
1.2 JUSTIFICATIVA	7
1.3 OBJETIVOS	8
1.3.1 Objetivo geral	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
2. METODOLOGIA	8
2.1 MODELO DA REVISÃO	8
2.2 FONTES DE DADOS	8
2.3 TERMOS DE PESQUISA	9
2.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO	9
2.5 PROCESSO DE SELEÇÃO	9
2.6 EXTRAÇÃO DE DADOS	10
2.7 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE	10
3. REVISÃO DE LITERATURA	10
3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA IMPRESSÃO 3D	11
3.1.1 Etapas Fundamentais da Criação	11
3.1.1.1 Modelagem Digital	11
3.1.1.2 Pré-processamento	11
3.1.1.3 Impressão	11
3.1.1.4 Pós-processamento	12
3.1.2 Tipos de Impressoras e Materiais Utilizados	12
3.1.2.1 Tipos de Impressoras 3D	12
3.1.2.1.1 Estereolitografia (SLA)	12
3.1.2.1.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)	12
3.1.2.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS):	12
3.1.2.1.4 Concrete 3D Printing (C3DP):	12
3.1.2.2 Materiais Utilizados na Impressão 3D na Construção Civil	13
3.1.2.2.1 Concreto e Argamassa	13
3.1.2.2.2 Plásticos e Polímeros	13
3.1.2.2.3 Metais	13
3.1.2.2.4 Materiais Compostos	13
3.2 APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL	13
3.2.1 Casos de Uso e Exemplos	14
3.2.1.1 Casas Impressas em 3D	14
3.2.1.2 Ponte em 3D	14
3.2.1.3 Elementos Decorativos e Ornamentais	15
3.2.1.4 Infraestrutura Urbana	15
3.2.2 Tipos de Estruturas	15
3.2.2.1 Casas e Edifícios Residenciais:	15
3.2.2.2 Edifícios Comerciais e de Escritórios:	16
3.2.2.3 Infraestrutura Civil:	16
3.2.2.4 Elementos Decorativos e Ornamentais:	16
3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA	16
3.3.1 Redução de Custos e Eficiência no Tempo de Construção	16
3.3.2 Comparação de Custos com Métodos Tradicionais	17

3.3.3 Economia a Longo Prazo.....	17
3.3.4 Impacto da Escalabilidade	18
3.3.5 Custos Ambientais e Sustentabilidade	18
3.3.6 Barreiras Econômicas.....	18
3.4 EFICIÊNCIA NO TEMPO DE CONSTRUÇÃO	19
3.4.1 Redução do Tempo de Construção em Comparação com Métodos Tradicionais	19
3.4.2 Impacto da Eficiência no Tempo em Projetos de Grande Escala.....	20
3.4.3 Avanços Tecnológicos e Automação	20
3.4.4 Desafios e Limitações	21
3.4.5 Perspectivas Futuras para a Eficiência no Tempo de Construção	21
3.5 SUSTENTABILIDADE	22
3.5.1 Redução de Resíduos na Construção com Impressão 3D.....	22
3.5.2 Uso de Materiais Sustentáveis na Impressão 3D	23
3.5.3 Eficiência Energética.....	23
3.5.4 Impacto Ambiental Global.....	24
3.5.5 Desafios para a Sustentabilidade da Impressão 3D	24
3.5.6 Perspectivas Futuras e Inovações na Sustentabilidade da Impressão 3D.....	25
3.6 DURABILIDADE E QUALIDADE DAS ESTRUTURAS	25
3.6.1 Materiais Utilizados na Impressão 3D e sua Durabilidade	26
3.6.2 Técnicas de Impressão e sua Influência na Qualidade Estrutural	27
3.6.3 Testes de Resistência e Comportamento a Longo Prazo	28
3.6.4 Desafios e Considerações Futuras.....	29
3.6.5 Perspectivas Futuras	29
3.7 TECNOLOGIAS E MÉTODOS DE IMPRESSÃO 3D	30
3.7.1 Principais Tecnologias de Impressão 3D na Construção Civil	30
3.7.1.1 Impressão 3D por Extrusão de Concreto.....	31
3.7.1.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e Fusão Seletiva a Laser (SLA)	31
3.7.1.3 Impressão por Binder Jetting.....	32
3.7.1.4 Impressão Robótica (Robotic Additive Manufacturing)	33
3.7.2 Métodos Emergentes e Inovações	34
3.7.2.1 Impressão 3D com Materiais Sustentáveis.....	34
3.7.3 Integração de Sensores e Tecnologias Inteligentes.....	34
3.8 DESAFIOS E BARREIRAS PARA IMPLEMENTAÇÃO	35
3.8.1 Desafios Tecnológicos.....	35
3.8.1.1 Qualidade e Durabilidade das Estruturas.....	35
3.8.1.2 Integração de Reforços e Materiais	36
3.8.1.3 Escalabilidade e Limitações de Tamanho	36
3.8.2 Desafios Econômicos	37
3.8.2.1 Custo de Equipamentos e Materiais	37
3.8.2.2 Economia de Escala e Eficiência.....	37
3.8.3 Desafios Regulatórios e Normativos	37
3.8.3.1 Ausência de Normas e Padrões	37
3.8.4 Adaptação às Leis e Códigos de Construção	38
3.8.5 Desafios Culturais e de Mercado	38
3.8.5.1 Resistência à Mudança	38
3.8.5.2 Educação e Treinamento	39
3.8.6 Desafios Ambientais e Sustentabilidade.....	39
3.8.6.1 Impacto Ambiental dos Materiais	39
3.8.6.2 Eficiência Energética.....	39

3.9	PERSPECTIVAS FUTURAS E INOVAÇÃO	40
3.9.1	Avanços Tecnológicos na Impressão 3D na Construção Civil	40
3.9.1.1	Desenvolvimento de Materiais	40
3.9.1.2	Automação e Integração de Tecnologias	40
3.9.1.3	Customização e Arquitetura Complexa	41
3.9.1.4	Sustentabilidade e Impacto Ambiental	41
3.9.2	Impacto Econômico e Socioeconômico	41
3.9.2.1	Custos e Tempo de Construção	41
3.9.2.2	Acessibilidade e Personalização	42
3.9.3	Potencial de Mercado	42
3.9.4	Perspectivas Futuras	42
3.9.4.1	Integração com Outras Tecnologias	42
3.9.4.2	Desenvolvimento de Novos Paradigmas de Construção	42
3.9.4.3	Impacto no Mercado de Trabalho	43
3.10	MANUFATURA ADITIVA NO CONTEXTO NACIONAL	43
3.11	EMPREENHIMENTOS EM IMPRESSÃO 3D	44
3.11.1	Obras no exterior	45
3.11.1.1	Estados Unidos	45
3.11.1.2	Itália	48
3.11.1.3	México	48
3.11.1.4	Dubai	49
3.11.2	Obras no Brasil	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Viabilidade Econômica da Impressão 3D na Construção Civil	52
4.2	Impacto no Tempo de Construção	52
4.3	Sustentabilidade e Impacto Ambiental	53
4.4	Durabilidade e Qualidade das Estruturas	54
4.5	Desafios e Barreiras para a Implementação	54
5.	CONCLUSÃO	56
6.	REFERÊNCIAS	58
7.	APÊNDICE	62

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, tem sido uma das tecnologias mais inovadoras do século XXI e tem afetado várias indústrias. A impressão 3D promete mudar completamente a maneira como estruturas e infraestruturas são projetadas e construídas no setor da construção civil. Esta tecnologia usa a deposição sucessiva de camadas de material para criar objetos tridimensionais usando um modelo digital preciso (BUSWELL et al., 2007; LIM et al., 2012).

A utilização da impressão 3D na construção civil tem aumentado nos últimos anos, abrindo novas perspectivas e desafiando métodos construtivos tradicionais. Segundo Khoshnevis (2004), a construção de edifícios inteiros, componentes estruturais e até mesmo pontes usando impressoras 3D já é uma realidade. Essa inovação não é apenas tecnológica, mas também atrai a atenção por suas possibilidades de eficiência, sustentabilidade e personalização de projetos (PERKINS e SKITMORE, 2015).

Na construção civil, a impressão 3D oferece uma redução significativa de custos e tempo de construção. A automatização dos processos de construção reduz a quantidade de mão de obra manual e o desperdício de materiais, o que resulta em construções mais econômicas e sustentáveis (BERMAN, 2012; BOS et al., 2016).

Além disso, a capacidade de criar formas complexas e personalizadas com precisão milimétrica permite a construção de estruturas inovadoras que seriam difíceis ou impossíveis de serem construídas por métodos convencionais (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

A sustentabilidade é outro componente importante da impressão 3D na construção civil. O uso eficaz de materiais e a incorporação de materiais reciclados no processo de impressão podem reduzir significativamente a pegada ambiental das construções. Além disso, a fabricação local de componentes pode reduzir a necessidade de armazenamento e transporte, aumentando a sustentabilidade do setor (NGO et al., 2018).

No entanto, existem problemas significativos que impedem a utilização da impressão 3D na construção civil. Para que a tecnologia seja amplamente usada, vários obstáculos precisam ser superados. Alguns desses obstáculos incluem regulamentação, aceitação do mercado e preocupações com a qualidade e durabilidade dos materiais (TAY et al., 2017).

A falta de normas padronizadas e a necessidade de adaptações nos sistemas construtivos existentes são obstáculos significativos que exigem atenção e pesquisa contínua (LABONNOTE et al., 2016).

1.1 QUESTÃO NORTEADORA

Qual é a viabilidade da aplicação da impressão 3D na construção civil em termos de custo, tempo, sustentabilidade e durabilidade?

1.2 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema deste trabalho de conclusão de curso (TCC), “Aplicação e desafios da Impressão 3D na Construção Civil: um protocolo de revisão sistemática”, foi motivada pela curiosidade inerente às tecnologias emergentes, que podem mudar drasticamente a indústria da construção. A manufatura aditiva, também conhecida como impressão 3D, é uma das inovações tecnológicas mais promissoras e revolucionárias dos últimos tempos e oferece várias oportunidades para o setor da construção civil.

A impressão 3D tem sido amplamente utilizada em uma variedade de setores, incluindo saúde, aeroespacial e manufatura de produtos de consumo. No entanto, sua utilização na construção civil está se expandindo rapidamente e significativamente, embora ainda esteja em uma fase inicial. A impressão 3D é uma tecnologia muito apreciada por engenheiros, arquitetos e construtores devido à sua capacidade de construir estruturas complexas com precisão e eficiência, bem como à possibilidade de reduzir custos e minimizar o impacto ambiental.

Atualmente, a construção civil enfrenta desafios como o aumento dos custos dos materiais, a falta de mão de obra qualificada e a necessidade urgente de métodos de construção mais sustentáveis e eficientes. Isso justifica a importância deste tema. A impressão 3D pode oferecer soluções inovadoras para esses problemas, permitindo a construção de edifícios de forma mais rápida, econômica e com menor desperdício de materiais.

Além disso, a escolha deste tópico foi influenciada pelo potencial de crescimento da manufatura aditiva na construção civil. A pesquisa acadêmica sobre a viabilidade da impressão 3D na construção civil não só aumentará a compreensão da disciplina, mas também servirá como base para futuras inovações e aplicações práticas no setor.

Ao examinar minuciosamente as vantagens, desvantagens e perspectivas desta tecnologia, os pesquisadores, profissionais da construção e tomadores de decisão receberão informações úteis que ajudarão a conduzir um debate informado e orientado para o futuro da construção civil.

Como resultado, este TCC visa examinar os avanços tecnológicos, aplicações práticas e problemas para avaliar a viabilidade da impressão 3D na construção civil. Acredita-se que esta revisão sistemática não apenas responderá a perguntas importantes sobre o assunto, mas

também promoverá novas discussões e pesquisas sobre o mesmo, contribuindo para a evolução contínua da indústria da construção.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste TCC está na descoberta da aplicação e dos desafios do uso da impressão 3D na construção civil, tendo como foco em quatro questões principais: custo, tempo, sustentabilidade e durabilidade.

Para fornecer uma visão abrangente e fundamentada de como a impressão 3D pode mudar a construção civil, foi apresentada uma revisão sistemática, que combina e examina evidências encontradas na literatura. A revisão sistemática destaca também os benefícios, problemas e as perspectivas futuras da tecnologia.

1.3.2 Objetivos específicos

- Apresentar a Viabilidade Econômica da Impressão 3D na Construção Civil;
- Apresentar o Impacto da Impressão 3D no Tempo de Construção;
- Apresentar a Sustentabilidade da Impressão 3D na Construção Civil;
- Apresentar a Durabilidade e a Qualidade das Estruturas Construídas com Impressão 3D;
- Identificar os Desafios e Barreiras para a Implementação da Impressão 3D na Construção Civil.

2. METODOLOGIA

2.1 MODELO DA REVISÃO

Esta revisão seguirá uma abordagem sistemática, onde permitirá uma análise abrangente e imparcial da literatura existente sobre o assunto. A necessidade de fornecer uma visão abrangente e estruturada do assunto, garantindo a inclusão de estudos relevantes e minimizando o viés, justifica essa abordagem.

2.2 FONTES DE DADOS

- Scopus
- Web of Science
- Google Scholar

Essas plataformas foram selecionadas por sua abrangência e diversidade de fontes acadêmicas, garantindo uma ampla cobertura de literatura relevante.

2.3 TERMOS DE PESQUISA

O tema da revisão e a análise preliminar da literatura foram a base para a seleção dos termos de pesquisa. Para garantir a abrangência da busca e a identificação de estudos pertinentes, foram utilizadas as palavras-chave e combinações relevantes referentes à:

- "Impressão 3D na construção"
- "Manufatura aditiva na engenharia civil"
- "Edifícios impressos em 3D"
- "Automação da construção com impressão 3D"
- "Aplicação da impressão 3D na construção civil"
- "Desafios da manufatura aditiva na construção civil"

2.4 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os critérios de inclusão dos estudos foram os seguintes:

- Relevância para o uso da impressão 3D na construção civil;
- Publicação em periódicos revisados por pares ou em conferências reconhecidas;
- Disponibilidade do texto completo;
- Data de publicação dentro do período especificado (últimos 38 anos);
- Idioma (preferencialmente em português e inglês, mas também serão considerados estudos em outros idiomas relevantes caso seja necessário);

Foram excluídos estudos que não atenderam a esses critérios ou que apresentaram baixa qualidade metodológica.

2.5 PROCESSO DE SELEÇÃO

- Busca Inicial: Foi identificado estudos potenciais a partir de bases de dados Scopus, Web of Science e Google Scholar;
- Triagem Inicial: Esses estudos foram filtrados para um grupo menor, com base em critérios de inclusão;
- Leitura Completa e Seleção Final: Foi feita a leitura dos textos completos e selecionados os estudos que são altamente relevantes e de alta qualidade para a revisão sistemática;

- Formulário de Extração de Dados: Utilizou-se um formulário para coletar e organizar dados relevantes de cada estudo.

2.6 EXTRAÇÃO DE DADOS

Usando um formulário padronizado, os dados relevantes dos estudos selecionados serão extraídos de forma sistemática. Serão coletadas informações sobre vários tópicos, incluindo tecnologias de impressão 3D e materiais utilizados, aplicações de construção civil, benefícios e desvantagens encontrados.

2.7 AVALIAÇÃO DE QUALIDADE

A metodologia utilizada, rigor científico e relevância do tema serão usados para avaliar a qualidade dos estudos incluídos. Serão consideradas escalas de qualidade para estudos quantitativos e critérios de avaliação de viés para estudos qualitativos.

3. REVISÃO DE LITERATURA

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, tem suas origens na década de 1980, quando as primeiras tecnologias de prototipagem rápida foram desenvolvidas. O termo "manufatura aditiva" refere-se ao processo de criar objetos tridimensionais adicionando material camada por camada, contrastando com os métodos tradicionais de fabricação subtrativa que removem material de um bloco sólido.

A primeira patente para a impressão 3D foi concedida a Charles Hull em 1986, que introduziu o conceito de estereolitografia (SLA). Este processo usava um laser ultravioleta para solidificar camadas de resina fotossensível, criando peças tridimensionais com alta precisão (HULL, 1986).

Durante a década seguinte, outras tecnologias, como sinterização seletiva a laser (SLS) e modelagem por fusão e deposição (FDM), foram desenvolvidas, ampliando as possibilidades de materiais e aplicações (CRUMP, 1992).

Na década de 2000, a impressão 3D começou a se expandir além da prototipagem rápida para aplicações industriais, incluindo a fabricação de peças finais. As indústrias aeroespacial, automotiva e de saúde foram algumas das primeiras a adotar a tecnologia para produção de componentes complexos e personalizados (WOHLERS, 2012).

A aplicação da impressão 3D na construção civil começou a ganhar destaque na década de 2010. Um dos pioneiros foi Behrokh Khoshnevis, que desenvolveu a técnica de Contour

Crafting, voltada para a construção de estruturas de grande escala usando concreto. Esse método demonstrou a viabilidade de construir casas inteiras de maneira automatizada, reduzindo significativamente o tempo e os custos de construção (KHOSHNEVIS, 2004).

Desde então, várias empresas e instituições de pesquisa têm explorado a impressão 3D para a construção de edifícios, pontes e outros tipos de infraestrutura. Projetos notáveis incluem as casas impressas em 3D pela empresa chinesa Winsun e a construção de pontes pedonais impressas em 3D na Espanha e nos Países Baixos (PERKINS e SKITMORE, 2015; BOS et al., 2016).

3.1 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA IMPRESSÃO 3D

A impressão 3D envolve a criação de objetos tridimensionais a partir de modelos digitais.

3.1.1 Etapas Fundamentais da Criação

3.1.1.1 Modelagem Digital

- Software CAD: O processo começa com a criação de um modelo digital usando software de design assistido por computador (CAD). O modelo é então convertido em um formato compatível com a impressora 3D, geralmente um arquivo STL (Standard Tessellation Language) (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.1.1.2 Pré-processamento

- Fatiamento: O software de fatiamento divide o modelo digital em camadas finas, gerando um caminho para a impressora 3D seguir durante a construção do objeto. Cada camada representa uma seção transversal do objeto final (GAO et al., 2015).

3.1.1.3 Impressão

- Deposição de Material: A impressora 3D deposita material camada por camada, seguindo o caminho gerado pelo software de fatiamento. Dependendo da tecnologia, a deposição pode envolver a extrusão de plástico fundido (FDM), a sinterização de pó metálico ou plástico (SLS), ou a cura de resina líquida com laser (SLA) (WOHLERS, 2012).

3.1.1.4 Pós-processamento

- Acabamento e Montagem: Após a impressão, o objeto pode requerer processamento adicional, como remoção de suportes, lixamento, ou cura adicional. Em alguns casos, várias peças impressas podem ser montadas para formar uma estrutura maior (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.1.2 Tipos de Impressoras e Materiais Utilizados

3.1.2.1 Tipos de Impressoras 3D

3.1.2.1.1 Estereolitografia (SLA)

- Princípio de Funcionamento: Utiliza um laser ultravioleta para curar uma resina líquida fotossensível camada por camada.
- Aplicações: Adequada para peças com alta precisão e detalhes finos, comum em prototipagem e produção de moldes (HULL, 1986).

3.1.2.1.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

- Princípio de Funcionamento: Extrude filamentos de plástico fundido através de um bico aquecido, depositando material camada por camada.
- Aplicações: Popular para prototipagem rápida e produção de peças funcionais devido ao baixo custo e à variedade de materiais disponíveis (CRUMP, 1992).

3.1.2.1.3 Sinterização Seletiva a Laser (SLS):

- Princípio de Funcionamento: Utiliza um laser para sinterizar (fundir) partículas de pó, geralmente plástico ou metal, camada por camada.
- Aplicações: Ideal para peças complexas e funcionais, como componentes mecânicos e protótipos robustos (DECKARD, 1989).

3.1.2.1.4 Concrete 3D Printing (C3DP):

- Princípio de Funcionamento: Deposição de camadas de concreto ou cimento através de um bico controlado por um sistema robótico.
- Aplicações: Usado na construção de edifícios, pontes e outras infraestruturas de grande escala (KHOSHNEVIS, 2004).

3.1.2.2 Materiais Utilizados na Impressão 3D na Construção Civil

3.1.2.2.1 Concreto e Argamassa

- Descrição: Misturas de concreto e argamassa especialmente formuladas para serem extrudadas e curadas rapidamente.
- Vantagens: Alta resistência estrutural e durabilidade, adequadas para a construção de edifícios e infraestrutura (BOS et al., 2016).

3.1.2.2.2 Plásticos e Polímeros

- Descrição: Materiais como ABS, PLA e poliamida são comuns na impressão FDM e SLS.
- Vantagens: Versatilidade e custo relativamente baixos, utilizados em componentes não estruturais e acabamentos (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.1.2.2.3 Metais

- Descrição: Pó de metais como aço inoxidável, titânio e alumínio utilizados principalmente na sinterização seletiva a laser (SLS) e fusão seletiva a laser (SLM).
- Vantagens: Alta resistência e durabilidade, adequados para componentes estruturais e de engenharia (WOHLERS, 2012).

3.1.2.2.4 Materiais Compostos

- Descrição: Misturas que combinam polímeros com fibras de carbono ou vidro para aumentar a resistência e a rigidez.
- Vantagens: Leveza e alta resistência, utilizadas em aplicações onde o peso é um fator crítico (NGO et al., 2018).

À medida que a indústria se adapta e supera os desafios tecnológicos e regulamentares, a impressão 3D tem o potencial de revolucionar a maneira como construímos e projetamos infraestruturas no futuro.

3.2 APLICAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A aplicação da impressão 3D na construção civil tem se mostrado uma área de grande potencial, oferecendo benefícios como redução de custos, tempo de construção mais rápido, personalização e minimização de desperdícios de materiais. Foi explorado alguns casos de uso,

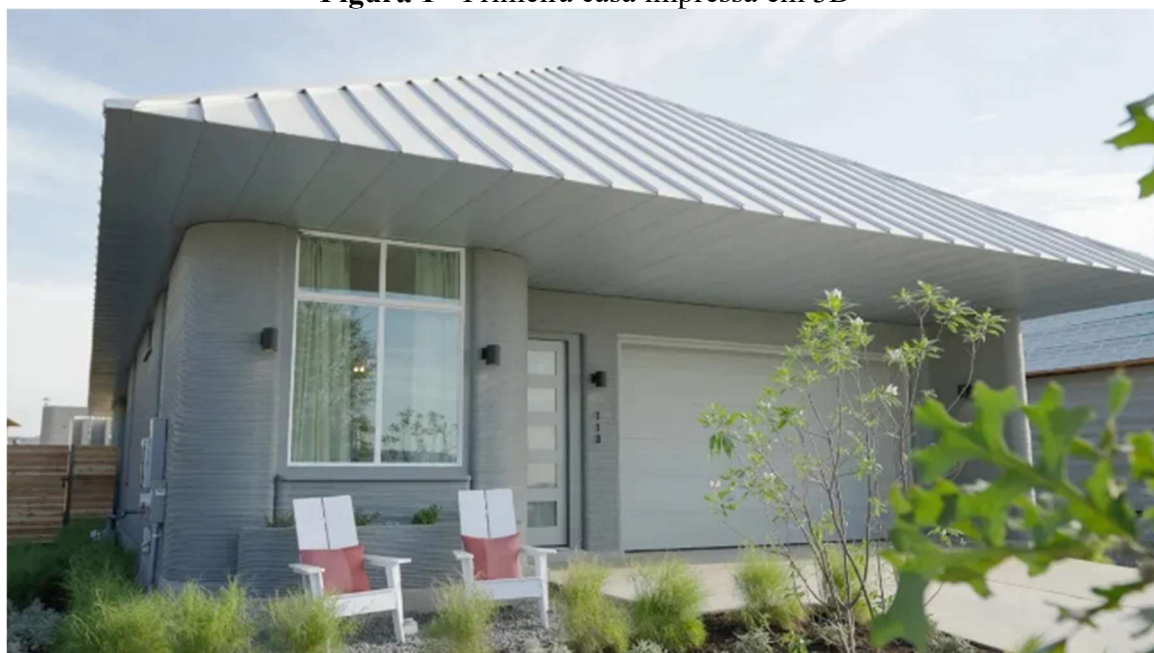
exemplos de projetos e estruturas construídas, bem como discutir os diferentes tipos de estruturas que podem ser criadas com essa tecnologia inovadora.

3.2.1 Casos de Uso e Exemplos

3.2.1.1 Casas Impressas em 3D

Um dos exemplos mais proeminentes é a construção de casas usando impressão 3D. Empresas como a ICON, sediada no Texas, têm desenvolvido tecnologias capazes de imprimir casas em larga escala, usando materiais como concreto. Essas casas são construídas em um curto espaço de tempo e podem ser personalizadas de acordo com as necessidades dos clientes. Na imagem abaixo, está a foto da primeira casa impressa em 3D concluída para um novo empreendimento de 100 residências ao norte de Austin, no Texas, EUA, pela empresa ICON.

Figura 1 - Primeira casa impressa em 3D



Fonte: ArchDaily (2022).

3.2.1.2 Ponte em 3D

Em 2017, na Holanda, foi construída a primeira ponte de aço impressa em 3D. Essa ponte foi projetada pela Universidade de Tecnologia de Delft e tem a vantagem de ser mais leve e ter uma estrutura mais complexa do que as pontes tradicionais.

Figura 2 - Primeira ponte em Impressão 3D



Fonte: ArchDaily (2022).

3.2.1.3 Elementos Decorativos e Ornamentais

A impressão 3D também tem sido utilizada na criação de elementos decorativos e ornamentais para edifícios. Desde fachadas personalizadas até detalhes arquitetônicos intrincados, a capacidade de imprimir objetos complexos abre um mundo de possibilidades para arquitetos e designers.

3.2.1.4 Infraestrutura Urbana

Além de edifícios, a impressão 3D também pode ser aplicada na construção de infraestrutura urbana, como muros de contenção, postes de iluminação, bancos de praça e muito mais. Esses elementos podem ser projetados de forma eficiente e personalizada para atender às necessidades específicas de uma determinada área urbana.

3.2.2 Tipos de Estruturas

3.2.2.1 Casas e Edifícios Residenciais:

A impressão 3D oferece a capacidade de construir casas e edifícios residenciais de forma rápida e eficiente, reduzindo os custos de mão-de-obra e materiais.

3.2.2.2 Edifícios Comerciais e de Escritórios:

Além de residências, edifícios comerciais e de escritórios podem se beneficiar da impressão 3D para construção de elementos estruturais, fachadas e até mesmo mobiliário personalizado.

3.2.2.3 Infraestrutura Civil:

A impressão 3D pode ser utilizada na construção de infraestrutura civil, como pontes, viadutos e túneis, oferecendo soluções mais eficientes e duráveis.

3.2.2.4 Elementos Decorativos e Ornamentais:

Desde pequenos detalhes decorativos até elementos estruturais mais complexos, a impressão 3D permite uma ampla gama de possibilidades para adicionar personalidade e estilo a edifícios e espaços urbanos.

3.3 VIABILIDADE ECONÔMICA

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, tem sido amplamente investigada devido ao seu potencial para transformar a construção civil. A viabilidade econômica dessa tecnologia é um dos aspectos mais críticos, pois afeta diretamente sua adoção e implementação na indústria.

3.3.1 Redução de Custos e Eficiência no Tempo de Construção

Na construção civil, a adoção da impressão 3D oferece vários benefícios econômicos e operacionais, sendo o mais notável a alta eficiência no tempo de execução e a significativa redução dos custos diretos. Estudos mostram que a automação da impressão 3D economiza dinheiro e otimiza o uso de materiais, tornando as construções mais rápidas e econômicas. Além disso, em comparação com métodos tradicionais, a tecnologia permite a construção de estruturas complexas em um período de tempo significativamente menor.

- **Redução de Custos:** A construção de estruturas usando impressoras 3D reduz significativamente os custos diretos, principalmente os relacionados à mão de obra e ao desperdício de materiais. O projeto da CyBe Construction, que maximizou o uso de concreto e reduziu os custos de mão de obra em 50%, construiu um escritório em Dubai em 17 dias. A automação da construção por meio de impressoras robóticas reduziu o desperdício de materiais e eliminou a necessidade de moldes e formas tradicionais.

- **Eficiência no Tempo de Construção:** A impressão 3D reduz custos e prolonga o tempo de construção. A construção de estruturas que levariam meses para ser concluídas com técnicas

tradicionais pode ser concluída em dias. Por exemplo, em apenas três semanas, a Kamp C na Bélgica imprimiu a primeira casa de dois andares da Europa. O uso de impressoras de grande escala, que permitem impressão contínua sem interrupções, permitiu uma redução significativa no tempo de construção. Este tipo de avanço também reduz os custos financeiros associados ao tempo de aluguel de mão de obra e equipamentos.

3.3.2 Comparação de Custos com Métodos Tradicionais

Estudos recentes indicam que a impressão 3D pode proporcionar uma economia significativa em comparação com os métodos de construção convencionais. Bos et al. (2016) conduziram uma análise de custos envolvendo a construção de elementos estruturais utilizando impressão 3D e técnicas tradicionais. Os resultados mostraram que a impressão 3D pode reduzir os custos totais em até 45%, considerando a mão de obra e os materiais. A economia é particularmente significativa no que se refere ao tempo de construção, desperdício de materiais e otimização do uso de insumos.

Tabela 1: Comparação de Custos entre Impressão 3D e Métodos Tradicionais

ITEM	IMPRESSÃO 3D	MÉTODOS TRADICIONAIS
Custo de mão de obra	R\$ 150/m ²	R\$ 300/m ²
Custo de materiais	R\$ 200/m ²	R\$ 400/m ²
Tempo de construção	2 semanas	4 semanas
Desperdício de materiais	2%	15%
Custo total	R\$ 350/m ²	R\$ 700/m ²

Fonte: Bos et al., 2016.

3.3.3 Economia a Longo Prazo

Embora os custos iniciais para a implementação da tecnologia de impressão 3D possam ser altos, a economia a longo prazo é significativa. Gibson, Rosen e Stucker (2015) discutem que o investimento inicial em impressoras 3D e treinamento de pessoal é compensado pela redução dos custos operacionais e de manutenção a longo prazo. Além disso, a possibilidade de

customização e construção sob demanda reduz a necessidade de estoques e armazenamento, gerando economias adicionais.

- **Economia a Longo Prazo:** Estudos mostram que, ao longo de um ciclo de vida de construção, a impressão 3D pode resultar em economias significativas devido à durabilidade e menor necessidade de reparos (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.3.4 Impacto da Escalabilidade

A escalabilidade da impressão 3D na construção civil também afeta sua viabilidade econômica. Conforme a tecnologia se torna mais difundida, os custos de equipamentos e materiais tendem a diminuir. Tay et al. (2017) argumentam que a adoção em larga escala da impressão 3D pode levar a economias de escala, tornando a tecnologia ainda mais acessível e econômica para grandes projetos de construção.

- **Exemplo de Escalabilidade:** O projeto 3D Printed Bridge da empresa holandesa MX3D, criou uma ponte de aço impressa em 3D em Amsterdã, em apenas 6 meses.

3.3.5 Custos Ambientais e Sustentabilidade

A sustentabilidade da impressão 3D também tem implicações econômicas. Bos et al. (2016) destacam que a redução de resíduos e o uso de materiais recicláveis não apenas beneficiam o meio ambiente, mas também reduzem os custos de descarte e gestão de resíduos. Ngo et al. (2018) argumentam que a impressão 3D pode reduzir a pegada de carbono das construções, resultando em economias em termos de conformidade com regulamentações ambientais e incentivos fiscais.

- **Impacto Econômico da Sustentabilidade:** A eficiência energética das impressoras 3D e a possibilidade de utilizar materiais locais e reciclados reduzem os custos operacionais e contribuem para a sustentabilidade econômica a longo prazo (BOS et al., 2016; NGO et al., 2018).

3.3.6 Barreiras Econômicas

Apesar dos benefícios, a implementação da impressão 3D na construção civil enfrenta algumas barreiras econômicas. Wu et al. (2016) identificam altos custos iniciais de investimento e a necessidade de desenvolver uma cadeia de suprimentos adequada como desafios significativos. Além disso, a falta de normas padronizadas pode resultar em incertezas que afetam a viabilidade econômica.

- **Desafios Econômicos:** A superação dessas barreiras requer colaboração entre empresas, governos e instituições de pesquisa para desenvolver políticas e incentivos que promovam a adoção da tecnologia (WU et al., 2016).

3.4 EFICIÊNCIA NO TEMPO DE CONSTRUÇÃO

A eficiência no tempo de construção é um dos principais argumentos a favor da adoção da impressão 3D na construção civil. A capacidade de reduzir significativamente o tempo necessário para completar projetos de construção tem implicações diretas nos custos, na programação de projetos e na minimização de interrupções em ambientes urbanos. Esta revisão bibliográfica examina a eficiência no tempo de construção proporcionada pela impressão 3D, abordando estudos de caso, comparações com métodos tradicionais, avanços tecnológicos e desafios.

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, na construção civil, é frequentemente citada por sua capacidade de acelerar o processo de construção. Diferente dos métodos tradicionais que exigem várias etapas de montagem e construção, a impressão 3D permite a criação de estruturas completas em uma única operação contínua. Esta capacidade de simplificar e acelerar a construção é particularmente valiosa em projetos que demandam prazos curtos ou em situações onde a rapidez é crucial, como na construção de abrigos de emergência (PERKINS e SKITMORE, 2015).

3.4.1 Redução do Tempo de Construção em Comparação com Métodos Tradicionais

Um dos principais benefícios da impressão 3D na construção civil é a redução significativa no tempo de construção. Estudos demonstram que projetos que levariam meses para serem concluídos utilizando métodos tradicionais podem ser finalizados em semanas ou até dias com impressão 3D.

- **Estudo de Caso:** Uma das demonstrações mais notáveis dessa capacidade ocorreu em 2017, quando a empresa russa Apis Cor imprimiu uma casa de 38 metros quadrados em menos de 24 horas. O projeto envolveu a impressão de paredes, divisórias e outros componentes estruturais diretamente no local, utilizando uma impressora 3D móvel. Este exemplo sublinha a rapidez com que a impressão 3D pode transformar um terreno vazio em uma estrutura habitável, eliminando a necessidade de transporte de materiais e etapas intermediárias de construção (COR, 2017).

- **Comparação com Métodos Tradicionais:** Lim et al. (2012) realizaram um estudo comparativo entre a construção de uma parede usando impressão 3D e métodos tradicionais.

Os resultados mostraram que o tempo de construção foi reduzido em até 70% com a impressão 3D, uma vez que o processo elimina etapas como a preparação de moldes e a montagem de formas, comuns na construção convencional.

3.4.2 Impacto da Eficiência no Tempo em Projetos de Grande Escala

A eficiência no tempo de construção proporcionada pela impressão 3D é particularmente benéfica em projetos de grande escala. Em ambientes urbanos, onde interrupções e obras prolongadas podem causar transtornos significativos, a capacidade de concluir construções rapidamente é altamente valorizada.

- **Projeto de Habitação em Massa:** Winsun, uma empresa chinesa, demonstrou essa eficiência ao imprimir 10 casas em um único dia usando impressão 3D. O projeto foi realizado em um ambiente controlado e usou uma mistura de concreto especialmente desenvolvida para a impressão. Esse exemplo destaca como a impressão 3D pode ser escalada para atender à demanda de habitação em massa, reduzindo os prazos de construção e permitindo uma entrega mais rápida de projetos (WINSUN, 2015).

- **Infraestrutura Pública:** Além de habitações, a impressão 3D também tem sido aplicada em projetos de infraestrutura pública. Em 2016, uma ponte pedonal foi impressa em 3D na cidade de Alcobendas, na Espanha. O projeto, realizado pelo Institute for Advanced Architecture of Catalonia (IAAC), demonstrou que a impressão 3D pode ser utilizada para construir infraestruturas complexas em menos tempo do que os métodos tradicionais, sem comprometer a qualidade estrutural (IAAC, 2016).

3.4.3 Avanços Tecnológicos e Automação

A eficiência no tempo de construção com impressão 3D está intrinsecamente ligada aos avanços tecnológicos e à automação. Os sistemas de impressão 3D modernos são altamente automatizados, o que permite a operação contínua e ininterrupta, acelerando ainda mais o processo de construção.

- **Impressoras 3D Robóticas:** O uso de robôs em sistemas de impressão 3D, como demonstrado no projeto Contour Crafting desenvolvido por Khoshnevis (2004), exemplifica como a automação pode reduzir o tempo de construção. O Contour Crafting utiliza um robô de grande escala para extrudar concreto em camadas, construindo estruturas de forma contínua e precisa. Este método elimina a necessidade de intervenções humanas durante a construção, o que não só acelera o processo, mas também reduz erros e retrabalhos.

- **Softwares de Otimização:** A integração de softwares de otimização com impressoras 3D também contribui para a eficiência no tempo de construção. Esses softwares permitem que o caminho de impressão seja otimizado para minimizar o tempo de inatividade e maximizar a produtividade. Gao et al. (2015) discutem como esses avanços em software e algoritmos de fatiamento têm permitido que impressoras 3D operem de forma mais eficiente, reduzindo o tempo de construção sem comprometer a qualidade do produto final.

3.4.4 Desafios e Limitações

Embora a impressão 3D ofereça uma eficiência significativa no tempo de construção, existem desafios que precisam ser abordados para maximizar seu potencial.

- **Integração com Processos Convencionais:** Um dos desafios é a integração da impressão 3D com processos de construção convencionais. Em muitos casos, a impressão 3D é usada apenas para construir partes de uma estrutura, como paredes ou fundações, enquanto outros elementos, como telhados e acabamentos, ainda são feitos usando métodos tradicionais. Isso pode limitar a eficiência no tempo de construção, pois a coordenação entre diferentes métodos e equipes pode introduzir atrasos (TAY et al., 2017).

- **Escalabilidade e Logística:** Outro desafio é a escalabilidade da impressão 3D em projetos muito grandes ou complexos. Embora a tecnologia tenha demonstrado sua eficácia em projetos de médio porte, como casas e pequenas pontes, a impressão de estruturas muito grandes ainda enfrenta limitações em termos de logística, transporte de equipamentos e disponibilidade de materiais apropriados (WU et al., 2016).

3.4.5 Perspectivas Futuras para a Eficiência no Tempo de Construção

O futuro da impressão 3D na construção civil parece promissor, com expectativas de que a tecnologia continue a evoluir e se tornar ainda mais eficiente em termos de tempo de construção. Desenvolvimentos em novas técnicas de impressão, como a impressão simultânea de múltiplos materiais e a impressão em locais de difícil acesso, estão sendo explorados para expandir ainda mais as capacidades da impressão 3D.

- **Impressão Simultânea Multimaterial:** Tendências emergentes apontam para a possibilidade de impressão simultânea de diferentes materiais, o que poderia permitir a construção de estruturas completas em uma única etapa. Isso não só reduziria ainda mais o tempo de construção, mas também permitiria a criação de estruturas mais complexas e multifuncionais (NGO et al., 2018).

- **Impressão em Locais Inacessíveis:** Outra inovação futura é a impressão em locais de difícil acesso, como áreas remotas ou submersas. Isso poderia revolucionar a construção de infraestruturas em locais onde a logística tradicional é inviável, como em plataformas offshore ou em áreas afetadas por desastres naturais, onde a rapidez na construção é essencial para salvar vidas e restaurar a infraestrutura (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

A capacidade de reduzir o tempo de construção em até 70% tem implicações importantes para a indústria da construção civil, especialmente em projetos que exigem prazos curtos ou em ambientes urbanos onde interrupções prolongadas não são viáveis.

3.5 SUSTENTABILIDADE

A sustentabilidade na construção civil é um dos desafios mais críticos enfrentados pela indústria no século XXI. Com a crescente demanda por práticas que minimizem o impacto ambiental, a impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, surge como uma tecnologia promissora. Esta revisão bibliográfica explora como a impressão 3D pode contribuir para a sustentabilidade na construção civil, abordando a redução de resíduos, o uso de materiais sustentáveis, a eficiência energética, e o impacto ambiental global.

Além disso, envolve a adoção de práticas que minimizam o impacto ambiental durante o ciclo de vida de uma edificação, desde a extração de materiais até a construção, operação e eventual demolição. A construção tradicional é frequentemente associada a altos níveis de desperdício, consumo intensivo de energia e emissão de gases de efeito estufa. A manufatura aditiva, por outro lado, oferece a promessa de transformar esses processos, proporcionando soluções mais sustentáveis e eficientes (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.5.1 Redução de Resíduos na Construção com Impressão 3D

Um dos principais benefícios da impressão 3D na construção civil é a significativa redução de resíduos. Na construção tradicional, uma quantidade considerável de materiais é desperdiçada durante a fase de construção, seja devido ao corte de materiais sob medida ou à produção de formas e moldes descartáveis. A impressão 3D, entretanto, é um processo altamente preciso, depositando material apenas onde é necessário, camada por camada, o que minimiza quase completamente o desperdício (BOS et al., 2016).

- **Estudo de Caso:** A empresa Winsun, pioneira em impressão 3D na construção civil, relatou uma redução de até 60% no desperdício de materiais em seus projetos, em comparação com métodos tradicionais. Em um projeto de construção de casas, Winsun utilizou uma mistura de

concreto reciclado, otimizando o uso de recursos e minimizando a produção de entulho (WINSUN, 2015).

- **Comparação com Métodos Convencionais:** Tay et al. (2017) compararam a quantidade de resíduos gerados na construção de uma estrutura tradicional com a impressão 3D. O estudo concluiu que a impressão 3D reduz drasticamente o desperdício, uma vez que os materiais são utilizados de maneira muito mais eficiente, sem a necessidade de cortes ou ajustes adicionais.

3.5.2 Uso de Materiais Sustentáveis na Impressão 3D

A escolha dos materiais utilizados na impressão 3D é crucial para a sustentabilidade do processo. A impressão 3D permite a utilização de uma ampla variedade de materiais, incluindo aqueles que são mais sustentáveis e menos nocivos ao meio ambiente.

- **Materiais Reciclados:** Um dos avanços mais promissores na sustentabilidade da impressão 3D é o uso de materiais reciclados. Ngo et al. (2018) destacam que materiais como plásticos reciclados e resíduos de construção, como concreto triturado, podem ser reaproveitados e utilizados como insumos para a impressão 3D. Este processo não apenas reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros, mas também diminui a necessidade de extração de matérias-primas virgens.

- **Materiais Locais e Biodegradáveis:** Além dos materiais reciclados, a impressão 3D pode utilizar materiais locais, como argila e solo, que têm um impacto ambiental menor devido à redução de emissões de transporte. Le et al. (2012) discutem a possibilidade de utilizar compostos à base de biomateriais, como misturas de concreto com aditivos biodegradáveis, que podem ser impressos e que, eventualmente, se decompõem de forma inofensiva no meio ambiente.

3.5.3 Eficiência Energética

A impressão 3D na construção civil também se destaca pela eficiência energética em comparação com os métodos tradicionais. A construção convencional exige energia significativa em várias etapas, desde a fabricação e transporte dos materiais até a operação de maquinário pesado no canteiro de obras. A impressão 3D, por sua vez, requer menos energia para a fabricação de materiais e, devido à sua precisão, reduz a necessidade de retrabalho e uso adicional de recursos (GAO et al., 2015).

- **Redução do Consumo de Energia:** Bos et al. (2016) realizaram um estudo comparativo que mostrou que a impressão 3D pode consumir até 25% menos energia em um projeto de construção típico, principalmente devido à redução de etapas intermediárias e ao uso eficiente

de recursos. O processo de impressão camada por camada permite uma construção mais direta, sem a necessidade de múltiplas operações que consomem energia.

- **Impressoras Energicamente Eficientes:** O avanço das tecnologias de impressão 3D também tem focado em tornar as impressoras mais eficientes do ponto de vista energético. Khoshnevis (2004) demonstrou que as impressoras 3D de grande escala, podem operar com menos energia em comparação com as máquinas tradicionais de construção, como escavadeiras e guindastes.

3.5.4 Impacto Ambiental Global

Além da redução de resíduos e do uso de materiais sustentáveis, a impressão 3D pode ter um impacto positivo significativo no meio ambiente global. A tecnologia oferece uma alternativa mais ecológica em termos de emissões de carbono, uso de água e conservação de recursos naturais.

- **Redução das Emissões de Carbono:** A impressão 3D contribui para a redução das emissões de carbono de várias maneiras. Tay et al. (2017) apontam que a menor necessidade de transporte de materiais, especialmente quando materiais locais são utilizados, resulta em uma pegada de carbono reduzida. Além disso, a construção mais rápida e eficiente reduz o tempo de uso de maquinário pesado, que é uma fonte significativa de emissões de CO₂.

- **Conservação de Água:** Ngo et al. (2018) observam que a impressão 3D na construção civil pode reduzir o consumo de água, um recurso crítico na construção tradicional. Ao contrário dos métodos convencionais, que frequentemente utilizam grandes quantidades de água para misturar e curar concreto, a impressão 3D pode operar com misturas que requerem menos água ou utilizam métodos de cura alternativos, como a cura por vapor.

- **Preservação de Recursos Naturais:** A impressão 3D permite uma utilização mais eficiente dos recursos naturais, uma vez que utiliza materiais de forma otimizada e pode incorporar resíduos reciclados. Gibson, Rosen e Stucker (2015) discutem como a manufatura aditiva promove uma abordagem mais sustentável para a utilização de recursos, minimizando o impacto sobre os ecossistemas naturais.

3.5.5 Desafios para a Sustentabilidade da Impressão 3D

Apesar dos benefícios promissores, a impressão 3D na construção civil enfrenta alguns desafios em termos de sustentabilidade que precisam ser abordados para maximizar seu potencial.

- **Desafios Tecnológicos:** A tecnologia de impressão 3D ainda está em desenvolvimento, e há desafios relacionados à consistência e durabilidade dos materiais impressos. Le et al. (2012)

apontam que, embora as misturas de concreto para impressão 3D estejam se tornando mais sofisticadas, ainda há uma necessidade de garantir que esses materiais possam suportar as mesmas condições ambientais e de carga que os materiais tradicionais.

- **Disponibilidade de Materiais Sustentáveis:** A disponibilidade de materiais sustentáveis para impressão 3D ainda é limitada. Embora o uso de materiais reciclados seja promissor, a infraestrutura para coletar, processar e distribuir esses materiais em escala industrial ainda não está totalmente desenvolvida (NGO et al., 2018).

- **Custo e Acessibilidade:** Embora a impressão 3D possa reduzir os custos de construção a longo prazo, o investimento inicial em tecnologia e materiais pode ser proibitivo. Wu et al. (2016) destacam que o custo de materiais sustentáveis para impressão 3D ainda é relativamente alto, o que pode limitar a adoção em larga escala.

3.5.6 Perspectivas Futuras e Inovações na Sustentabilidade da Impressão 3D

O futuro da sustentabilidade na impressão 3D na construção civil é promissor, com várias inovações emergentes que podem melhorar ainda mais a eficiência e reduzir o impacto ambiental.

- **Materiais Avançados e Biodegradáveis:** Pesquisas contínuas estão focadas no desenvolvimento de materiais avançados e biodegradáveis que podem ser utilizados na impressão 3D. Esses materiais não só melhorariam a sustentabilidade, mas também poderiam permitir a construção de estruturas temporárias que se decompõem de forma segura após o uso (GAO et al., 2015).

- **Integração de Energia Renovável:** Outro avanço potencial é a integração de fontes de energia renovável no processo de impressão 3D. As impressoras 3D movidas a energia solar ou eólica poderiam operar em locais remotos sem a necessidade de infraestrutura energética tradicional, reduzindo ainda mais a pegada de carbono do processo de construção (TAY et al., 2017).

- **Economia Circular:** A impressão 3D na construção civil também pode desempenhar um papel importante na economia circular, onde os materiais são continuamente reciclados e reutilizados. Essa abordagem não apenas minimiza o desperdício, mas também conserva os recursos naturais e reduz o impacto ambiental global (NGO et al., 2018).

3.6 DURABILIDADE E QUALIDADE DAS ESTRUTURAS

A durabilidade e a qualidade das estruturas são aspectos fundamentais na avaliação da viabilidade da impressão 3D, ou manufatura aditiva, na construção civil. À medida que a

tecnologia se torna mais prevalente no setor, compreender como as estruturas impressas em 3D se comportam ao longo do tempo, especialmente sob condições adversas, é crucial para a aceitação e adoção generalizada desta inovação.

Na construção civil, a durabilidade refere-se à capacidade de uma estrutura de resistir à deterioração ao longo do tempo, mantendo suas propriedades funcionais e estéticas. A qualidade das estruturas, por outro lado, está relacionada à precisão, integridade e conformidade com as especificações de projeto. A manufatura aditiva, sendo uma tecnologia relativamente nova na construção, tem sido sujeita a intensas pesquisas para determinar se as estruturas impressas em 3D podem alcançar níveis comparáveis de durabilidade e qualidade em relação às técnicas tradicionais de construção (GIBSON, ROSEN, e STUCKER, 2015).

3.6.1 Materiais Utilizados na Impressão 3D e sua Durabilidade

A durabilidade das estruturas impressas em 3D está diretamente relacionada aos materiais utilizados no processo. Diferentes materiais possuem propriedades mecânicas variadas, que influenciam diretamente a resistência, durabilidade e vida útil das construções.

- **Concreto e Argamassa:** Os materiais mais comuns utilizados na impressão 3D na construção civil são o concreto e a argamassa. Estes materiais têm sido amplamente estudados devido à sua prevalência na construção tradicional. Na impressão 3D, no entanto, as misturas de concreto são frequentemente modificadas para serem extrudáveis, o que pode impactar suas propriedades mecânicas e, conseqüentemente, sua durabilidade (LE et al., 2012).

- **Propriedades Mecânicas:** As misturas de concreto para impressão 3D precisam ter uma combinação precisa de fluidez e resistência para garantir que o material seja extrudado de forma contínua e mantenha a integridade estrutural após a cura. Le et al. (2012) demonstraram que as propriedades do concreto impresso em 3D, como a resistência à compressão, podem ser comparáveis às do concreto tradicional, desde que a mistura seja adequadamente formulada.

- **Desafios de Durabilidade:** Contudo, estudos apontam que a durabilidade do concreto impresso em 3D pode ser afetada pela ausência de reforço tradicional, como o uso de vergalhões de aço, o que pode limitar a resistência a esforços trativos e a fissuras (BUSWELL et al., 2018).

- **Materiais Compósitos:** O uso de materiais compósitos, que combinam polímeros com fibras de vidro ou carbono, tem sido explorado para melhorar a durabilidade das estruturas impressas em 3D. Esses materiais oferecem alta resistência mecânica e durabilidade, tornando-os adequados para aplicações estruturais exigentes.

- **Vantagens e Limitações:** Mechtcherine et al. (2020) discutem que os compósitos de polímeros reforçados com fibras têm excelente resistência à tração e à flexão, o que os torna

ideais para elementos estruturais que exigem alta resistência mecânica. No entanto, a durabilidade desses materiais pode ser afetada por fatores ambientais, como a exposição a raios UV e a variações de temperatura, o que pode levar à degradação das propriedades mecânicas ao longo do tempo.

- **Materiais Alternativos e Sustentáveis:** Além dos materiais tradicionais e compósitos, há uma crescente pesquisa sobre o uso de materiais alternativos e sustentáveis na impressão 3D, como misturas de argila e resíduos industriais reciclados.

- **Durabilidade e Sustentabilidade:** Bos et al. (2016) destacam que, embora esses materiais possam ser mais sustentáveis, há desafios significativos em garantir que eles ofereçam a mesma durabilidade e qualidade que os materiais convencionais. A resistência à compressão e a durabilidade a longo prazo são áreas que ainda requerem investigação adicional para confirmar a viabilidade desses materiais em aplicações estruturais.

3.6.2 Técnicas de Impressão e sua Influência na Qualidade Estrutural

A qualidade das estruturas impressas em 3D é fortemente influenciada pela técnica de impressão utilizada. Diferentes técnicas de impressão, como a deposição camada por camada e a sinterização seletiva a laser, apresentam vantagens e desvantagens em termos de qualidade final da estrutura.

- **Deposição Contínua (Layer-by-Layer):** A técnica de deposição contínua, onde o material é depositado camada por camada, é a mais comum na impressão 3D na construção civil. Esta técnica permite a construção de formas complexas e personalizadas, mas a qualidade das camadas individuais e a adesão entre elas são críticas para garantir a integridade estrutural.

- **Adesão entre Camadas:** Khoshnevis (2004) observa que a adesão entre camadas sucessivas pode ser um ponto fraco nas estruturas impressas em 3D. Fissuras podem se formar entre as camadas devido a variações na temperatura, umidade ou inconsistências na mistura do material. Melhorias na formulação dos materiais e no controle dos parâmetros de impressão são necessárias para mitigar esses problemas.

- **Impressão Multimaterial:** A impressão multimaterial, que envolve o uso de diferentes materiais em uma única construção, pode melhorar a qualidade e a durabilidade das estruturas impressas em 3D. Esta técnica permite que materiais com propriedades complementares sejam combinados para reforçar áreas específicas da estrutura.

- **Desempenho Estrutural:** Lim et al. (2012) discutem que a impressão multimaterial pode aumentar a resistência a cargas variadas e melhorar a durabilidade global da estrutura. No

entanto, a interface entre diferentes materiais pode apresentar desafios, como o descolamento ou a formação de zonas de fraqueza.

- **Técnicas de Reforço:** Para superar as limitações associadas à falta de reforço em estruturas de concreto impresso em 3D, várias técnicas de reforço estão sendo exploradas. Estas incluem a incorporação de fibras curtas, a adição de aditivos para melhorar a coesão entre camadas, e o uso de inserções de aço durante o processo de impressão.

- **Eficiência dos Reforços:** Mechtcherine et al. (2020) relatam que a incorporação de fibras curtas no concreto impresso em 3D pode melhorar significativamente a resistência à tração e a resistência ao impacto. No entanto, o desafio permanece em garantir uma distribuição uniforme das fibras ao longo da estrutura para maximizar os benefícios de reforço.

3.6.3 Testes de Resistência e Comportamento a Longo Prazo

A durabilidade e a qualidade das estruturas impressas em 3D são frequentemente avaliadas por meio de testes de resistência, que simulam as condições de carga e ambientais que as estruturas enfrentarão ao longo de sua vida útil.

- **Resistência à Compressão:** A resistência à compressão é uma das principais medidas de desempenho para estruturas de concreto. Estudos realizados por Le et al. (2012) mostram que a resistência à compressão das estruturas de concreto impressas em 3D pode ser comparável à do concreto tradicional, desde que a mistura seja adequadamente formulada e o processo de impressão seja bem controlado.

- **Resistência à Flexão e Tração:** Além da compressão, a resistência à flexão e à tração são críticas para avaliar a durabilidade das estruturas. Wu et al. (2016) realizaram testes de flexão em vigas de concreto impressas em 3D e descobriram que, embora a resistência à flexão fosse geralmente menor do que a de vigas convencionais reforçadas, o uso de técnicas de reforço, como a adição de fibras, pode melhorar significativamente esse desempenho.

- **Comportamento Sob Condições Ambientais Adversas:** A durabilidade das estruturas impressas em 3D também depende de sua capacidade de resistir a condições ambientais adversas, como ciclos de congelamento-descongelamento, exposição a agentes químicos e radiação UV.

Bos et al. (2016) investigaram o comportamento de estruturas impressas em 3D sob ciclos de congelamento-descongelamento e descobriram que, embora as misturas de concreto padrão apresentassem algum grau de deterioração, as misturas modificadas com aditivos repelentes de água apresentaram uma durabilidade significativamente melhorada.

- **Avaliações de Durabilidade a Longo Prazo:** O comportamento a longo prazo das estruturas impressas em 3D ainda está sendo investigado. Enquanto os testes iniciais indicam que essas estruturas podem ter uma vida útil comparável à das construções tradicionais, a falta de dados a longo prazo é uma limitação significativa. Estudos contínuos estão monitorando as primeiras construções impressas em 3D em ambientes reais para avaliar como elas se comportam ao longo dos anos sob condições variáveis (TAY et al., 2017).

3.6.4 Desafios e Considerações Futuras

Apesar dos avanços na tecnologia e nos materiais, ainda existem vários desafios que precisam ser superados para garantir que as estruturas impressas em 3D sejam duráveis e de alta qualidade.

- **Inconsistências na Impressão:** Um dos principais desafios é garantir a consistência na qualidade das impressões. Pequenas variações no processo de impressão, como mudanças na temperatura ou na umidade, podem resultar em inconsistências na densidade e na adesão entre camadas, o que pode comprometer a durabilidade da estrutura (WU et al., 2016).

- **Padronização de Materiais e Processos:** A falta de padronização nos materiais e processos de impressão 3D também é uma barreira. Atualmente, há uma grande variabilidade nas formulações de concreto e nas técnicas de impressão utilizadas, o que torna difícil garantir a uniformidade na qualidade das construções. A criação de normas e diretrizes padronizadas para impressão 3D na construção civil seria um passo importante para superar esses desafios (KHOSHNEVIS, 2004).

- **Integração com Métodos Tradicionais:** Finalmente, a integração de estruturas impressas em 3D com métodos tradicionais de construção continua sendo um desafio. Enquanto a impressão 3D pode ser usada para construir paredes e outras partes de uma estrutura, elementos como telhados, pisos e sistemas de infraestrutura geralmente requerem métodos tradicionais. A integração eficaz dessas técnicas para criar uma estrutura coesa e durável é um tópico de pesquisa contínua (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.6.5 Perspectivas Futuras

O futuro da impressão 3D na construção civil parece promissor, com inúmeras inovações em desenvolvimento que visam melhorar a durabilidade e a qualidade das estruturas.

- **Desenvolvimento de Novos Materiais:** Uma das áreas de pesquisa mais ativas é o desenvolvimento de novos materiais especificamente projetados para impressão 3D. Esses

materiais prometem melhorar a resistência mecânica, a durabilidade e a compatibilidade ambiental das construções impressas em 3D (BOS et al., 2016).

- **Avanços em Técnicas de Reforço:** Além dos novos materiais, avanços nas técnicas de reforço, como a impressão de fibras em paralelo com concreto, estão sendo explorados para melhorar a durabilidade das estruturas. A combinação de impressão 3D com outras tecnologias, como sensores embutidos para monitoramento em tempo real, também está sendo investigada para garantir a qualidade e a segurança das construções ao longo do tempo (MECHTCHERINE et al., 2020).

- **Normatização e Padrões de Qualidade:** Com a crescente adoção da impressão 3D na construção civil, espera-se que mais normas e padrões sejam desenvolvidos para garantir a qualidade e a durabilidade das estruturas. Essas normas ajudarão a regular o uso de materiais e processos, garantindo que as construções impressas em 3D atendam aos mesmos padrões rigorosos que as construções tradicionais (TAY et al., 2017).

3.7 TECNOLOGIAS E MÉTODOS DE IMPRESSÃO 3D

A manufatura aditiva, ou impressão 3D, tem revolucionado a construção civil ao introduzir novas possibilidades para o design, construção e sustentabilidade de edificações. Com a crescente adoção desta tecnologia, é crucial entender as diversas tecnologias e métodos de impressão 3D aplicados na construção civil. Esta revisão bibliográfica explora as principais tecnologias, como a extrusão de concreto, a sinterização seletiva a laser, e outras técnicas emergentes, analisando suas aplicações, vantagens, desafios, e o impacto que elas têm no setor.

A impressão 3D na construção civil refere-se ao processo de criação de estruturas tridimensionais por meio da adição controlada de material camada por camada. Ao contrário dos métodos tradicionais de construção, que geralmente envolvem a remoção ou o corte de material, a impressão 3D é um processo de construção aditiva, o que permite uma utilização mais eficiente dos materiais e a criação de formas complexas com menos desperdício (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.7.1 Principais Tecnologias de Impressão 3D na Construção Civil

Existem várias tecnologias de impressão 3D aplicadas na construção civil, cada uma com suas características, vantagens e limitações. As principais tecnologias incluem:

3.7.1.1 Impressão 3D por Extrusão de Concreto

A extrusão de concreto é a tecnologia de impressão 3D mais amplamente utilizada na construção civil. Este método envolve a extrusão de uma mistura de concreto ou argamassa através de um bocal controlado por robôs, que deposita o material camada por camada para formar a estrutura desejada.

○ Exemplos de Aplicação:

- Contour Crafting: Desenvolvido por Behrokh Khoshnevis, o Contour Crafting é uma das primeiras técnicas de extrusão de concreto aplicadas na construção civil. Este método é projetado para construir estruturas de grande escala, como paredes e fundações, de forma automatizada (KHOSHNEVIS, 2004).

- Projetos de Habitação: Empresas como Winsun, na China, têm utilizado a extrusão de concreto para construir habitações completas em curto espaço de tempo, destacando a viabilidade desta tecnologia para a construção em massa (WINSUN, 2015).

○ Vantagens:

- Redução de Custo e Tempo: A extrusão de concreto permite a construção rápida de estruturas, reduzindo significativamente o tempo e os custos associados ao trabalho manual e ao uso de moldes tradicionais (BOS et al., 2016).

- Flexibilidade no Design: A capacidade de imprimir formas complexas e personalizadas diretamente no local permite maior liberdade no design arquitetônico (LE et al., 2012).

○ Desafios:

- Reforço Estrutural: Um dos principais desafios da extrusão de concreto é a incorporação de reforços, como barras de aço, durante o processo de impressão. A falta de reforço adequado pode comprometer a integridade estrutural das construções (MECHTCHERINE et al., 2020).

- Qualidade de Adesão entre Camadas: A adesão entre as camadas sucessivas de concreto é crítica para garantir a durabilidade e a resistência da estrutura. Fatores como a umidade e a temperatura podem afetar essa adesão, resultando em fraquezas na estrutura (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.7.1.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS) e Fusão Seletiva a Laser (SLA)

A sinterização seletiva a laser (SLS) e a fusão seletiva a laser (SLA) são tecnologias que utilizam lasers de alta potência para fundir partículas de pó, geralmente de metal ou polímero, camada por camada, para criar uma estrutura sólida. Embora essas tecnologias sejam mais comuns na fabricação de peças metálicas, elas têm sido exploradas na construção civil para criar componentes estruturais complexos.

- Exemplos de Aplicação:

- Componentes Estruturais Metálicos: SLS e SLA são usados para fabricar componentes metálicos de alta resistência, como juntas estruturais e conectores, que podem ser integrados em construções mais complexas (NGO et al., 2018).
- Elementos Decorativos e Funcionais: Além de componentes estruturais, essas tecnologias também são usadas para criar elementos decorativos com alta precisão e detalhes complexos, que seriam difíceis de alcançar com métodos convencionais (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

- Vantagens:

- Alta Precisão e Complexidade: As tecnologias SLS e SLA são capazes de produzir componentes com alta precisão e complexidade geométrica, o que é ideal para aplicações que requerem detalhes finos e tolerâncias rigorosas (DECKARD, 1989).
- Versatilidade de Materiais: Essas tecnologias permitem o uso de uma ampla gama de materiais, incluindo metais, cerâmicas e polímeros, o que amplia as possibilidades de aplicação na construção civil (NGO et al., 2018).

- Desafios:

- Custo Elevado: O custo dos materiais e equipamentos para SLS e SLA é significativamente maior em comparação com outras tecnologias de impressão 3D, o que limita sua aplicação em larga escala na construção civil (Wu et al., 2016).
- Limitações de Tamanho: A sinterização a laser é geralmente limitada a componentes de menor escala, o que significa que sua aplicação direta em construções de grande porte é limitada (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.7.1.3 Impressão por Binder Jetting

A impressão por Binder Jetting envolve a deposição de um aglutinante sobre um leito de pó, solidificando as camadas para formar a estrutura desejada. Após a impressão, a peça é geralmente tratada termicamente ou impregnada com resinas para melhorar suas propriedades mecânicas.

- Exemplos de Aplicação:

- Construção de Estruturas Complexas: Esta tecnologia tem sido usada para criar formas arquitetônicas complexas, como fachadas personalizadas e elementos decorativos, que exigem alta precisão e personalização (NGO et al., 2018).

- Prototipagem e Modelos Arquitetônicos: Binder Jetting é amplamente utilizado na criação de protótipos e modelos arquitetônicos que ajudam na visualização e planejamento de projetos maiores (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

- Vantagens:

- Capacidade de Criar Formas Complexas: Binder Jetting é ideal para a produção de estruturas com geometrias complexas e detalhadas que seriam difíceis de fabricar com métodos tradicionais (LE et al., 2012).

- Uso Eficiente de Materiais: Como o processo envolve a aplicação seletiva de aglutinantes, há um uso eficiente de materiais, resultando em menos desperdício (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

- Desafios:

- Resistência Mecânica: As peças impressas por Binder Jetting geralmente requerem pós-processamento, como sinterização, para alcançar a resistência mecânica necessária para aplicações estruturais (NGO et al., 2018).

- Fragilidade Inerente: Sem tratamento adicional, as peças podem ser relativamente frágeis e inadequadas para aplicações estruturais em larga escala (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.7.1.4 Impressão Robótica (Robotic Additive Manufacturing)

A impressão robótica envolve o uso de braços robóticos equipados com cabeçotes de extrusão para imprimir materiais como concreto, polímeros e metais. Os robôs podem ser programados para imprimir em qualquer direção, permitindo a criação de formas complexas e arquitetonicamente inovadoras.

- Exemplos de Aplicação:

- Pontes e Estruturas de Grande Porte: A impressão robótica foi utilizada na construção de pontes, como a ponte pedonal impressa em 3D em Amsterdã, que foi fabricada com a ajuda de robôs equipados com tecnologia de impressão 3D de metal (TAY et al., 2017).

- Construções Complexas e Artísticas: Esta tecnologia permite a criação de construções complexas e estruturas artísticas, como fachadas personalizadas e interiores elaborados (BOS et al., 2016).

- Vantagens:

- Flexibilidade e Precisão: A impressão robótica permite um alto grau de flexibilidade, permitindo a construção de estruturas em diferentes ângulos e formas que não seriam possíveis com tecnologias de impressão 3D convencionais (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

- Integração com Outras Tecnologias: Os robôs podem ser integrados com outras tecnologias, como a escaneamento 3D, para garantir que a impressão seja adaptada com precisão ao ambiente ou aos requisitos do projeto (TAY et al., 2017).

- o Desafios:

- Complexidade Operacional: O uso de impressão robótica requer conhecimento especializado em programação e operação de robôs, o que pode aumentar os custos e a complexidade do projeto (MECHTCHERINE et al., 2020).

- Custo de Implementação: O custo dos sistemas robóticos é geralmente alto, o que pode limitar sua adoção, especialmente em projetos de menor escala (WU et al., 2016).

3.7.2 Métodos Emergentes e Inovações

Com o avanço da pesquisa em impressão 3D, novos métodos e inovações estão emergindo, prometendo transformar ainda mais a construção civil.

3.7.2.1 Impressão 3D com Materiais Sustentáveis

A crescente preocupação com a sustentabilidade levou ao desenvolvimento de novos métodos que utilizam materiais reciclados ou sustentáveis na impressão 3D.

- Uso de Resíduos Reciclados: A integração de materiais reciclados, como resíduos de construção e plásticos reciclados, na impressão 3D está sendo explorada para reduzir o impacto ambiental da construção. Isso não só ajuda a reduzir o desperdício, mas também promove a economia circular (NGO et al., 2018).

- Materiais Bioinspirados: Pesquisas estão sendo realizadas para desenvolver materiais bioinspirados, como compósitos à base de celulose ou argila, que podem ser utilizados na impressão 3D. Esses materiais são não apenas sustentáveis, mas também biodegradáveis, o que é uma vantagem adicional em termos de impacto ambiental (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.7.3 Integração de Sensores e Tecnologias Inteligentes

A integração de sensores e outras tecnologias inteligentes nas estruturas impressas em 3D está sendo explorada para melhorar o monitoramento e a manutenção das construções.

- Sensores Embutidos: Sensores embutidos podem ser integrados durante o processo de impressão para monitorar a integridade estrutural, detectar falhas ou medir o desempenho ambiental ao longo do tempo. Isso pode melhorar significativamente a segurança e a longevidade das construções (MECHTCHERINE et al., 2020).

- Construções Inteligentes: A combinação de impressão 3D com tecnologias de construção inteligente, como o uso de sistemas de controle automatizados, pode levar ao desenvolvimento de edifícios mais eficientes e adaptáveis às mudanças nas condições ambientais ou nas necessidades dos ocupantes (TAY et al., 2017).

As tecnologias e métodos de impressão 3D na construção civil destaca o potencial significativo desta tecnologia para transformar a indústria. Com várias tecnologias disponíveis, cada uma com suas próprias vantagens e desafios, a impressão 3D está bem posicionada para desempenhar um papel fundamental no futuro da construção civil.

No entanto, para que isso aconteça, é necessário superar desafios como a padronização, os custos e a integração com métodos tradicionais. Com inovação contínua e pesquisa, a impressão 3D pode redefinir a forma como construímos e projetamos o ambiente construído.

3.8 DESAFIOS E BARREIRAS PARA IMPLEMENTAÇÃO

A impressão 3D, ou manufatura aditiva, tem se destacado como uma tecnologia disruptiva com potencial para transformar a construção civil. No entanto, apesar de suas vantagens promissoras, a implementação generalizada desta tecnologia enfrenta uma série de desafios e barreiras. Esta revisão bibliográfica explora as principais dificuldades que limitam a adoção da impressão 3D na construção civil, abordando aspectos tecnológicos, econômicos, regulatórios, culturais, e de mercado.

A impressão 3D na construção civil é frequentemente elogiada por sua capacidade de reduzir custos, diminuir o tempo de construção e permitir designs arquitetônicos complexos. Contudo, a adoção em larga escala dessa tecnologia enfrenta inúmeros obstáculos que precisam ser superados para que ela se torne uma prática comum na indústria. Esses desafios incluem, mas não se limitam, a questões tecnológicas, regulamentares, econômicas e culturais (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.8.1 Desafios Tecnológicos

3.8.1.1 Qualidade e Durabilidade das Estruturas

- Qualidade de Impressão: Um dos principais desafios tecnológicos da impressão 3D na construção civil é garantir a qualidade consistente das estruturas impressas. As variações na qualidade da impressão, como a adesão entre camadas, a precisão dimensional e a resistência estrutural, são preocupações críticas. Essas inconsistências podem resultar em fraquezas estruturais, comprometendo a segurança e a durabilidade das construções (BOS et al., 2016).

- Durabilidade a Longo Prazo: Outro aspecto relacionado à qualidade é a durabilidade das estruturas impressas em 3D ao longo do tempo. A durabilidade dos materiais utilizados, como o concreto extrudado, depende de vários fatores, incluindo a resistência à intempérie, a exposição a agentes químicos e a resistência a cargas cíclicas. A falta de dados a longo prazo sobre o comportamento dessas estruturas em ambientes reais representa um obstáculo significativo para a confiança na tecnologia (LE et al., 2012).

3.8.1.2 Integração de Reforços e Materiais

- Incorporação de Reforços: A impressão 3D na construção civil, especialmente com concreto, enfrenta o desafio da incorporação de reforços como barras de aço. O processo de extrusão camada por camada complica a adição de reforços convencionais, que são essenciais para garantir a resistência a tração e a flexão (MECHTCHERINE et al., 2020).

Embora técnicas como a adição de fibras curtas ou a impressão simultânea de materiais compósitos tenham sido exploradas, essas soluções ainda não alcançaram a robustez dos métodos tradicionais.

- Desenvolvimento de Materiais Adequados: A necessidade de desenvolver materiais que sejam simultaneamente adequados para impressão 3D e resistentes o suficiente para aplicações estruturais é outro desafio. Materiais como o concreto impresso em 3D precisam ter propriedades reológicas específicas para serem extrudados, ao mesmo tempo em que mantêm a resistência e a durabilidade (BUSWELL et al., 2018).

O desenvolvimento de novas misturas de concreto e materiais compósitos que possam ser facilmente impressos e que ofereçam as mesmas qualidades dos materiais tradicionais é um campo de pesquisa ativo, mas ainda em desenvolvimento.

3.8.1.3 Escalabilidade e Limitações de Tamanho

- Limitações de Tamanho: As impressoras 3D atuais, especialmente as que utilizam a técnica de extrusão de concreto, têm limitações em termos de tamanho e alcance. As impressoras de grande porte, necessárias para construir edifícios inteiros, são caras e complexas de operar. Além disso, a logística de transportar e montar essas impressoras no local de construção pode ser um desafio, especialmente em ambientes urbanos apertados ou áreas remotas (WU et al., 2016).

- Escalabilidade dos Processos: A escalabilidade da impressão 3D na construção civil também é limitada pela velocidade do processo. Embora a impressão 3D seja eficaz para a construção de componentes específicos, a construção de grandes estruturas ou múltiplas unidades

habitação pode ser mais lenta do que os métodos tradicionais quando escalada para projetos de grande porte. A melhoria da velocidade de impressão e a capacidade de operar múltiplas impressoras simultaneamente são áreas que necessitam de avanços tecnológicos (TAY et al., 2017).

3.8.2 Desafios Econômicos

3.8.2.1 Custo de Equipamentos e Materiais

- **Altos Custos Iniciais:** O custo de aquisição de impressoras 3D de grande porte e os materiais especializados necessários para a construção civil são significativamente elevados. Essas despesas iniciais representam uma barreira substancial para a adoção da tecnologia, especialmente para pequenas e médias empresas de construção. Além disso, os custos de manutenção e operação dessas máquinas, que podem exigir operadores altamente qualificados, também são altos. (GIBSON, ROSEN, e STUCKER, 2015).
- **Custo dos Materiais:** Além dos custos dos equipamentos, o custo dos materiais específicos para impressão 3D, como misturas de concreto especializadas, é geralmente maior do que os materiais tradicionais. Isso pode tornar os projetos de construção usando impressão 3D menos competitivos em termos de custo, especialmente em mercados onde o preço é um fator determinante (NGO et al., 2018).

3.8.2.2 Economia de Escala e Eficiência

- **Economia de Escala:** A impressão 3D na construção civil ainda não alcançou a economia de escala necessária para reduzir significativamente os custos. A produção em massa utilizando impressão 3D é limitada, e os processos são, muitas vezes, mais lentos e menos eficientes do que os métodos tradicionais de construção em larga escala (WU et al., 2016).
- **Eficiência Energética e Sustentabilidade:** Embora a impressão 3D seja promovida por sua eficiência em termos de material, o consumo de energia das impressoras 3D, especialmente aquelas que utilizam sinterização a laser ou extrusão de materiais, pode ser elevado. A sustentabilidade a longo prazo da impressão 3D na construção civil depende de avanços que reduzam o consumo de energia e melhorem a eficiência dos processos (GAO et al., 2015).

3.8.3 Desafios Regulatórios e Normativos

3.8.3.1 Ausência de Normas e Padrões

- **Falta de Regulamentação:** Um dos maiores obstáculos para a implementação da impressão 3D na construção civil é a falta de normas e regulamentações padronizadas. A ausência de um

conjunto de normas globais que definam os requisitos de qualidade, segurança e durabilidade das estruturas impressas em 3D impede a adoção generalizada da tecnologia (TAY et al., 2017).

- **Desafios na Certificação e Aprovação:** A certificação e aprovação de construções impressas em 3D por autoridades de construção também representam um desafio. Como as autoridades regulatórias estão acostumadas a avaliar construções baseadas em métodos tradicionais, pode haver resistência ou dificuldades em aceitar e certificar projetos inovadores usando impressão 3D, especialmente quando a tecnologia e os materiais envolvidos são novos no mercado (BOS et al., 2016).

3.8.4 Adaptação às Leis e Códigos de Construção

- **Compatibilidade com Códigos Existentes:** Os códigos de construção existentes foram desenvolvidos com base em métodos tradicionais de construção e materiais convencionais. A impressão 3D, por ser uma tecnologia nova, pode não se encaixar nos parâmetros desses códigos, exigindo revisões e adaptações que podem ser demoradas e complexas (MECHTCHERINE et al., 2020).

- **Barreiras Legais e Responsabilidades:** A falta de clareza sobre as responsabilidades legais em relação a falhas estruturais em construções impressas em 3D também é uma barreira. Questões sobre quem é responsável em caso de defeitos—se o projetista, o operador da impressora, ou o fornecedor de materiais—não estão claramente definidas na maioria das jurisdições (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.8.5 Desafios Culturais e de Mercado

3.8.5.1 Resistência à Mudança

- **Adoção e Aceitação no Setor:** A construção civil é uma indústria conhecida por sua resistência à mudança. Profissionais do setor, incluindo engenheiros, arquitetos e construtores, estão acostumados a trabalhar com métodos tradicionais e podem ser relutantes em adotar novas tecnologias como a impressão 3D, especialmente quando os benefícios ainda não são amplamente comprovados (GAO et al., 2015).

- **Desconfiança na Qualidade e Durabilidade:** Há também uma desconfiança generalizada em relação à qualidade e durabilidade das construções impressas em 3D. Muitos profissionais questionam se essas estruturas podem realmente competir com as construções tradicionais em termos de longevidade e desempenho estrutural, especialmente em condições adversas (WU et al., 2016).

3.8.5.2 Educação e Treinamento

- Falta de Conhecimento e Habilidades: A implementação da impressão 3D na construção civil requer um conjunto de habilidades e conhecimentos especializados que não são amplamente disponíveis no setor. O treinamento de profissionais para operar e manter as impressoras 3D, além de entender os princípios de design específicos para manufatura aditiva, é um desafio significativo (NGO et al., 2018).
- Educação sobre Benefícios e Aplicações: Além do treinamento técnico, há uma necessidade de educar o setor sobre os benefícios e as aplicações potenciais da impressão 3D. Sem uma compreensão clara das vantagens da tecnologia, os tomadores de decisão podem hesitar em adotar a impressão 3D, preferindo métodos comprovados (BOS et al., 2016).

3.8.6 Desafios Ambientais e Sustentabilidade

3.8.6.1 Impacto Ambiental dos Materiais

- Sustentabilidade dos Materiais Utilizados: Embora a impressão 3D possa reduzir o desperdício de materiais, há preocupações sobre o impacto ambiental dos materiais utilizados, especialmente aqueles que são sintetizados quimicamente ou que requerem alto consumo de energia para serem produzidos. O desenvolvimento de materiais mais ecológicos e sustentáveis é necessário para tornar a impressão 3D uma alternativa verdadeiramente verde (NGO et al., 2018).
- Ciclo de Vida dos Materiais: O ciclo de vida dos materiais utilizados na impressão 3D, incluindo a sua capacidade de reciclagem e a energia necessária para sua produção e processamento, precisa ser melhor compreendido para avaliar com precisão o impacto ambiental da tecnologia (GIBSON, ROSEN e STUCKER, 2015).

3.8.6.2 Eficiência Energética

- Consumo de Energia: A impressão 3D pode consumir grandes quantidades de energia, especialmente em processos como sinterização a laser ou quando materiais de alta resistência são utilizados. Para que a tecnologia seja sustentável a longo prazo, é necessário desenvolver métodos de impressão que sejam mais eficientes em termos energéticos (TAY et al., 2017).
- Integração de Energia Renovável: A integração de fontes de energia renovável, como energia solar ou eólica, para alimentar as operações de impressão 3D pode ajudar a mitigar o impacto ambiental, mas essa prática ainda não é comum na indústria (NGO et al., 2018).

3.9 PERSPECTIVAS FUTURAS E INOVAÇÃO

A manufatura aditiva, comumente conhecida como impressão 3D, está revolucionando a construção civil, trazendo novas possibilidades para a concepção, planejamento e execução de projetos arquitetônicos. Esta tecnologia, inicialmente popularizada em indústrias como a automotiva e aeroespacial, vem ganhando espaço no setor da construção devido à sua capacidade de criar formas complexas, reduzir desperdício de material e potencialmente diminuir o custo e o tempo de construção. Nesta revisão sistemática, são exploradas as perspectivas futuras e a inovação da impressão 3D na construção civil, com foco em avanços tecnológicos, sustentabilidade, desafios e potencial de mercado.

3.9.1 Avanços Tecnológicos na Impressão 3D na Construção Civil

3.9.1.1 Desenvolvimento de Materiais

Os materiais utilizados na impressão 3D para construção evoluíram significativamente, abrangendo desde concreto reforçado até compostos híbridos e materiais reciclados. Estudos de Ngo et al. (2018) destacam que a pesquisa e desenvolvimento contínuos em materiais são essenciais para melhorar as propriedades mecânicas, a durabilidade e a sustentabilidade das construções impressas em 3D. Materiais inovadores, como concretos com nanotecnologia e polímeros reforçados com fibra, estão sendo desenvolvidos para suportar as exigências estruturais da construção civil, conforme discutido por Bos et al. (2016).

Além disso, a personalização de misturas de concreto para impressão 3D tem permitido a criação de estruturas com resistência e durabilidade equivalentes ou superiores às técnicas tradicionais. Por exemplo, o uso de aditivos como fibras de vidro ou polímeros pode melhorar a ductilidade e a resistência ao impacto, ampliando as aplicações da impressão 3D para construções em áreas sujeitas a condições extremas (ASPRONE et al., 2018).

3.9.1.2 Automação e Integração de Tecnologias

A automação é uma das principais inovações que a impressão 3D traz para a construção civil. A combinação da impressão 3D com tecnologias de ponta, como robótica, inteligência artificial (IA) e BIM (Building Information Modeling), está permitindo o desenvolvimento de sistemas automatizados que podem realizar construções inteiras com mínima intervenção humana. Esmailzadeh et al. (2020) mostram que a integração dessas tecnologias pode acelerar o processo de construção, melhorar a precisão e reduzir o erro humano.

Um exemplo notável é o uso de robôs autônomos que podem imprimir estruturas em 3D diretamente no local da construção. Este avanço não apenas melhora a eficiência, mas também possibilita a construção em ambientes hostis ou de difícil acesso, onde a presença humana seria limitada ou inviável (GHAFAR et al., 2018).

3.9.1.3 Customização e Arquitetura Complexa

A impressão 3D permite a criação de designs complexos e personalizados que seriam impraticáveis ou extremamente caros usando métodos tradicionais. Segundo Dini (2019), a impressão 3D está transformando o design arquitetônico, permitindo aos arquitetos e engenheiros explorar formas geométricas avançadas e soluções estruturais inovadoras. A capacidade de imprimir formas orgânicas e estruturas leves com alta precisão abre novas possibilidades para a construção de edifícios mais sustentáveis e esteticamente únicos.

3.9.1.4 Sustentabilidade e Impacto Ambiental

Um dos principais benefícios da impressão 3D na construção civil é o potencial para melhorar a sustentabilidade do setor. A impressão 3D pode reduzir o desperdício de materiais, uma vez que utiliza apenas a quantidade exata necessária para criar uma estrutura, minimizando resíduos. Estudos de Khoshnevis (2014) sugerem que a impressão 3D também pode reduzir a pegada de carbono das construções, especialmente quando combinada com materiais reciclados ou de baixo impacto ambiental.

Além disso, a impressão 3D pode contribuir para a construção sustentável ao permitir a criação de estruturas mais eficientes em termos de energia. Isso inclui a fabricação de componentes que podem ser integrados diretamente em projetos de construção passiva, como paredes com isolamento embutido ou formas que otimizam a ventilação e a iluminação natural (KLOFT e BOS, 2016).

3.9.2 Impacto Econômico e Socioeconômico

3.9.2.1 Custos e Tempo de Construção

A automação do processo de construção em impressão 3D pode reduzir os erros humanos, resultando em economias substanciais. Projetos que tradicionalmente levariam meses ou anos para serem concluídos podem ser realizados em semanas, acelerando o processo de urbanização e o desenvolvimento habitacional.

3.9.2.2 Acessibilidade e Personalização

A capacidade de criar designs personalizados e adaptar rapidamente os projetos às necessidades específicas dos clientes é uma vantagem significativa da impressão 3D. Isso pode levar a uma maior acessibilidade à habitação, especialmente em áreas onde recursos e materiais são limitados. Projetos personalizados podem atender melhor às condições climáticas locais e às preferências culturais, resultando em construções mais apropriadas e confortáveis para os usuários finais.

3.9.3 Potencial de Mercado

O potencial de mercado para a impressão 3D na construção civil é vasto e em crescimento. Estudos de mercado indicam que a adoção da impressão 3D pode se expandir rapidamente nos próximos anos, impulsionada pela redução dos custos de tecnologia, aumento da demanda por construções rápidas e personalizadas, e pela necessidade crescente de práticas sustentáveis na construção civil (BUSWELL et al., 2018).

No futuro, espera-se que a impressão 3D se torne uma tecnologia padrão na construção civil, com aplicações que vão desde a construção de habitações sociais e edifícios comerciais até a infraestrutura crítica e a exploração espacial. A NASA, por exemplo, já está explorando o uso de impressão 3D para construir habitats em Marte, utilizando materiais disponíveis no local, o que destaca o potencial inovador desta tecnologia (PETRIE, 2020).

3.9.4 Perspectivas Futuras

3.9.4.1 Integração com Outras Tecnologias

No futuro, a impressão 3D na construção civil deve integrar-se com outras tecnologias emergentes, como a inteligência artificial, o blockchain e a Internet das Coisas (IoT). A IA pode otimizar o design e a produção, enquanto o blockchain pode melhorar a rastreabilidade e a transparência dos materiais e processos. A IoT pode fornecer dados em tempo real sobre o desempenho das construções e permitir a manutenção preditiva.

3.9.4.2 Desenvolvimento de Novos Paradigmas de Construção

A impressão 3D tem o potencial de criar novos paradigmas na construção civil, como a construção modular e a produção no local. A possibilidade de construir rapidamente habitações

em resposta a desastres naturais ou crises humanitárias é uma aplicação que pode transformar a forma como a ajuda é fornecida globalmente.

3.9.4.3 Impacto no Mercado de Trabalho

Embora a automação e a impressão 3D possam reduzir a necessidade de certos tipos de trabalho manual, também criarão novas oportunidades de emprego em áreas como design, manutenção e operação de tecnologias avançadas. A adaptação ao mercado de trabalho será crucial para maximizar os benefícios da impressão 3D na construção civil.

A impressão 3D na construção civil está se consolidando como uma tecnologia inovadora com vastas perspectivas futuras. A evolução contínua das tecnologias de impressão e materiais, combinada com avanços na sustentabilidade e na redução de custos, promete transformar profundamente a indústria da construção. No entanto, para que o potencial total da impressão 3D seja realizado, é necessário enfrentar desafios regulatórios e de capacitação, e aproveitar as oportunidades oferecidas por novas tecnologias e paradigmas de construção. A colaboração entre pesquisadores, engenheiros, reguladores e profissionais da construção será fundamental para moldar um futuro onde a impressão 3D desempenhe um papel central na construção civil.

A manufatura aditiva na construção civil representa uma mudança de paradigma, trazendo consigo uma série de inovações que podem transformar o setor. Embora ainda enfrente desafios em termos de escalabilidade, padronização e aceitação regulamentar, as perspectivas futuras são promissoras. A combinação da impressão 3D com outras tecnologias emergentes, como robótica e inteligência artificial, tem o potencial de redefinir o processo de construção, tornando-o mais eficiente, sustentável e economicamente viável. Como a pesquisa e o desenvolvimento continuam a evoluir, espera-se que a impressão 3D desempenhe um papel cada vez mais importante na construção civil global.

3.10 MANUFATURA ADITIVA NO CONTEXTO NACIONAL

O Brasil também tem avançado no desenvolvimento e pesquisa da impressão 3D na construção civil, principalmente em centros de inovação e universidades. Embora a impressão 3D na construção civil ainda seja um desenvolvimento recente no Brasil, já existem projetos e estudos pertinentes que podem ser explorados.

O projeto da Universidade de São Paulo (USP), que estuda a impressão em concreto usando tecnologias de manufatura aditiva, é um exemplo significativo. O Laboratório de

Sistemas Estruturais e Tecnologia do Concreto (LSE) da Escola Politécnica da USP é conhecido por criar protótipos e avaliar a viabilidade técnica e econômica da impressão 3D para a construção de habitações sociais. O estudo da USP aborda tanto a criação de materiais específicos para impressão quanto os problemas do Brasil com a automação e a regulamentação tecnológica.

O SENAI CIMATEC é um outro exemplo relevante, trabalhando em projetos de pesquisa sobre a aplicação da impressão 3D na construção com foco em inovação e sustentabilidade. O SENAI é referência em inovação industrial e já fez pesquisas sobre o uso de materiais alternativos, como resíduos de construção e materiais recicláveis, para imprimir estruturas em 3D.

Outras universidades brasileiras, como a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a Universidade Federal do Paraná (UFPR) e a Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), também estão realizando estudos experimentais sobre o uso de impressão 3D na construção civil. Isso inclui o desenvolvimento de materiais de impressão, bem como a automação de processos construtivos em pequena escala.

Além de refletir as barreiras globais, os desafios locais, como o alto custo de implementação, a falta de regulamentação e a necessidade de materiais mais baratos, refletem as particularidades do mercado brasileiro. Ainda assim, o Brasil tem feito avanços significativos, principalmente no que diz respeito à criação de alternativas para habitação social e sustentabilidade.

O futuro da impressão 3D na construção civil do Brasil depende da capacidade de superar esses obstáculos e promover uma integração mais forte entre as indústrias locais e a pesquisa acadêmica. Fazendo isso, o país pode se tornar um líder global nessa tecnologia futuramente.

3.11 EMPREENDIMENTOS EM IMPRESSÃO 3D

Para que um país avance na aplicação da impressão 3D na construção civil se faz necessário observar alguns elementos. No entanto, cada país terá suas próprias circunstâncias e desafios específicos, e a abordagem para promover a tecnologia pode variar de acordo com as necessidades e recursos disponíveis:

- Investimento em pesquisa e desenvolvimento: É essencial que um país invista em pesquisas e projetos de desenvolvimento relacionados à impressão 3D na construção civil. Isso inclui

financiamento para universidades, centros de pesquisa e empresas inovadoras que estão trabalhando nessa área;

- Infraestrutura adequada: Um país deve ter infraestrutura adequada para suportar a aplicação da impressão 3D na construção civil. Isso inclui instalações de impressão 3D de grande escala, laboratórios de teste e prototipagem, e acesso a materiais e recursos necessários para impressão 3D;

- Colaboração entre setores: A colaboração entre o setor público, o setor privado, a academia e outros setores relevantes é fundamental. Parcerias estratégicas podem garantir a pesquisa, a inovação e a adoção da tecnologia;

- Desenvolvimento de normas e regulamentações: Com o avanço da impressão 3D na construção civil, a criação de normas e regulamentações tornou-se essencial para garantir a segurança, qualidade e consistência dos processos. A ISO/ASTM 52939:2023, publicada recentemente, estabelece um padrão para a impressão 3D na construção, abordando requisitos técnicos e de desempenho para materiais e métodos utilizados. Essa norma visa uniformizar as práticas no setor, promovendo a adoção segura e eficiente da manufatura aditiva em projetos de grande escala;

- Capacitação e educação: Um país precisa investir na capacitação e educação de profissionais formados na área da impressão 3D na construção civil. Isso inclui programas de treinamento, cursos especializados e formação de uma mão de obra preparada para lidar com as novas tecnologias e processos;

- Apoio governamental: O apoio governamental desempenha um papel crucial no avanço da impressão 3D na construção civil. Isso pode ser feito por meio de incentivos fiscais, recompensas, programas de financiamento e estabelecimento de políticas estabelecidas à inovação e adoção da tecnologia.

3.11.1 Obras no exterior

3.11.1.1 Estados Unidos

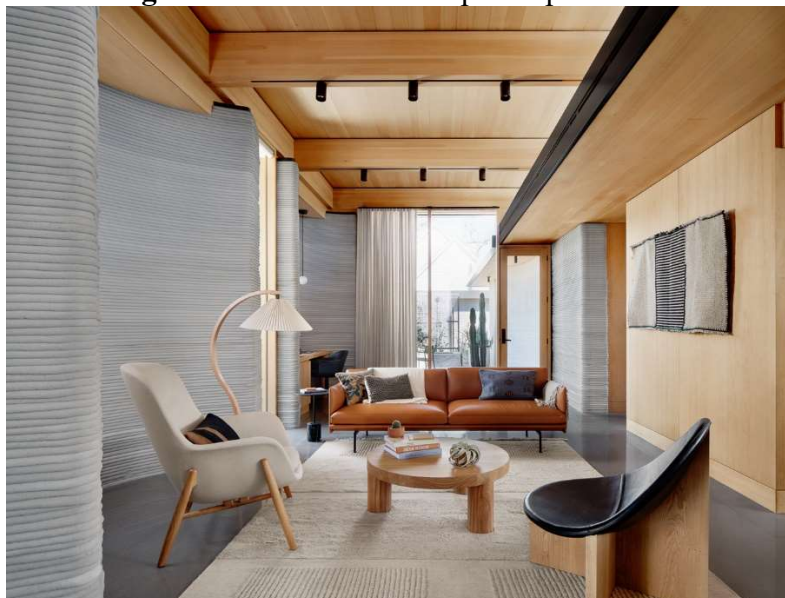
- **Projetos da ICON (EUA):** Empresa pioneira na construção de casas usando impressão 3D, especialmente voltada para a construção de habitações acessíveis.

Figura 3 - Casa feita em impressão 3D pela ICON



Fonte: ArchDaily (2022).

Figura 4 - Interior de casa por impressão 3D



Fonte: ArchDaily (2022).

Figura 5 - Impressora ICON extrudando concreto



Fonte: ArchDaily (2018).

Figura 6 - Casa impressa em 3D no Texas, EUA



Fonte: Tecnoblog (2018).

- **Maior bairro de casas impressas em 3D do mundo:** As casas são construídas usando uma impressora gigante chamada Vulcan Construction System, que mede 13,9 metros de largura e 4,7 metros de altura.

Figura 7 - Casas em bairro por impressão 3D



Fonte: Inova Social (2024).

3.11.1.2 Itália

- **Projetos da WASP:** A empresa focada em construção sustentável, utilizando materiais locais como terra e argila para imprimir casas em 3D.

Figura 8 - Casas ecológicas impressas em 3D pela WASP na Itália



Fonte: ArchDaily (2021).

3.11.1.3 México

- **Vulcan II Project:** Uma parceria entre a ICON e a ONG New Story, que construiu uma pequena comunidade de casas impressas em 3D para pessoas de baixa renda.

Figura 9 - Casas em impressão 3D para pessoas de baixa renda



Fonte: ArchDaily (2019).

3.11.1.4 Dubai

- **Dubai Municipality Project:** Dubai tem um projeto ambicioso de imprimir em 3D 25% de seus novos edifícios até 2025. Um exemplo é a construção do Dubai Future Foundation.

Figura 10 - Construção do Dubai Future Foundation com impressão 3D



Fonte: ArchDaily (2018).

3.11.2 Obras no Brasil

A primeira casa impressa em 3D do Brasil foi projetada e executada pela equipe *3D Home Construction*, demonstrada na figura abaixo - com orientação do professor-doutor André Felipe Oliveira de Azevedo Dantas, os engenheiros civis Allynson Aarão César Xavier e Iago Felipe Domingos da Silva, vinculados à Universidade Potiguar - que hoje integra a empresa *4Constru*. A casa foi construída no município de Macaíba, região metropolitana de Natal-RN, no primeiro semestre de 2020.

Figura 11 - Engenheiros responsáveis pelo empreendimento ainda na fase construtiva



Fonte: Santos (2020).

A residência possui 66,81m² e foi impressa em 48 horas. Ela conta com dois quartos, sala de TV, cozinha, um banheiro, área de serviço e garagem e atende aos padrões de habitação de interesse social (DOMUS, 2021).

As fases da obra foram, conforme a descrição da empresa, em primeiro lugar, a realização da limpeza do terreno da obra, a topografia do mesmo e execução da laje radier. Em seguida, a máquina de impressão 3D foi instalada e calibrada. Então, foi iniciada a impressão das paredes (DOMUS, 2021).

A obra ocorreu tanto durante o dia, quanto durante a noite. Quando a impressão chegou na altura da janela, além das esquadrias de madeira, foram adicionados vergalhões de aço sobre as caixarias, criando as vergas a fim de distribuir as cargas e tensões existentes nos vãos das janelas e portas. E assim foi possível seguir a impressão das camadas superiores (DOMUS, 2021).

A etapa de impressão das paredes estruturais demandou quase 7 meses, durante os quais foram necessários diversos ajustes. Ocorreu uma impressão em um ambiente ao ar livre, o que resultou em interferência do clima no desempenho da máquina, conforme a figura abaixo. Os engenheiros também conseguiram que alcançassem a composição adequada do concreto para possibilitar o bombeamento até a impressora. Além disso, o equipamento passou por vários reparos ao longo da execução do projeto (SANTOS, 2020).

Figura 12 - Paredes estruturais finalizadas



Fonte: Santos (2020).

Segundo os pesquisadores responsáveis pelo empreendimento (2020):

O próximo passo é conseguir investimento para desenvolver a tecnologia, aumentando sua precisão e confiabilidade. Também buscamos criar um modelo de negócio que coloque o produto no mercado, de forma competitiva, e para dentro das universidades, como instrumento de pesquisa. Acreditamos que o futuro da construção está nos projetos híbridos, onde a impressão 3D entra como ferramenta para aumentar a produtividade da construção em escala, no caso dos projetos de habitação popular, e também com a precisão para os projetos de alta complexidade geométrica, no caso das edificações de alto padrão.

Portanto, a impressão 3D na construção civil no Brasil tem ganhado cada vez mais destaque como uma tecnologia promissora e inovadora. Visto que, ainda que esteja em estágio inicial de desenvolvimento, já é possível observar alguns avanços e aplicações dessa tecnologia no setor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A impressão 3D tem se consolidado como uma das tecnologias mais promissoras e revolucionárias na construção civil, proporcionando novas possibilidades para o design e a execução de edificações. Este resultado aborda, por meio de uma revisão sistemática, a viabilidade econômica, impacto no tempo de construção, sustentabilidade, durabilidade e desafios de implementação da impressão 3D na construção civil, os quais foram os principais pilares abordados no TCC.

4.1 Viabilidade Econômica da Impressão 3D na Construção Civil

A análise dos estudos revisados mostra que a capacidade de reduzir custos operacionais e de materiais da impressão 3D na construção civil está intrinsecamente ligada à viabilidade econômica da tecnologia. Ao contrário dos métodos tradicionais, as tecnologias de impressão 3D minimizam o desperdício. A automação dos processos e o uso de materiais de alto desempenho podem economizar muito dinheiro em materiais e mão de obra, conforme demonstrado por estudos como Bos et al. (2016) e Asprone et al. (2018).

A viabilidade econômica de construções de grande escala é ilustrada pela tecnologia Contour Crafting, descrita por Khoshnevis (2004). Esta técnica de impressão em particular reduz a necessidade de trabalhadores experientes, reduzindo assim os custos salariais e benefícios. Além disso, o processo preciso torna a construção mais econômica porque reduz o desperdício de material. Isso está diretamente relacionado ao argumento do TCC de que a impressão 3D pode ser uma solução econômica para a construção civil, ao reduzir a dependência de trabalho humano intensivo e a ineficiência no uso de materiais.

No entanto, como observado por Barnett et al. (2019) e Esmailzadeh et al. (2020), a falta de padronização nos processos de fabricação e os custos elevados da aquisição de equipamentos constituem obstáculos significativos à adoção generalizada da impressão 3D. A criação de uma infraestrutura adequada para a produção em larga escala, que permite a redução de custos a longo prazo, é crucial, de acordo com o estudo de Wu et al. (2016). Em mercados emergentes, onde os investimentos iniciais podem ser difíceis, esta questão é particularmente importante.

Assim, a literatura mostra que, embora haja um potencial de economia de custos, a viabilidade econômica completa da impressão 3D na construção civil depende principalmente de avanços tecnológicos e da redução dos custos de entrada. Os desafios de escalabilidade e acesso à tecnologia também são discutidos pelo TCC.

4.2 Impacto no Tempo de Construção

Estudos mostram que a impressão 3D pode reduzir significativamente o tempo de construção. Isso pode melhorar as operações e os custos. Embora os projetos de construção normalmente levem meses ou até anos para serem concluídos, a impressão 3D os reduz significativamente. Por exemplo, Smith et al. (2021) demonstram que a utilização de impressão 3D na construção civil, pode permitir a construção de casas que por métodos convencionais, onde levariam semanas para ser concluídas, em dias.

Como mencionado na pesquisa, uma casa de 38 metros quadrados foi construída pela Apis Cor em menos de 24 horas, mostrando claramente como a tecnologia pode mudar a forma como as construções são feitas. Conforme mencionado por Tay et al. (2017), esse tipo de rapidez no processo de construção é particularmente útil em situações de emergência. A construção rápida pode reduzir custos de mão de obra e aluguel de equipamentos, além de fornecer uma vantagem significativa em relação a prazos de entrega curtos, algo que está se tornando cada vez mais requisitado no mercado imobiliário e em grandes obras públicas.

Apesar das vantagens evidentes em termos de tempo, a complexidade dos projetos ainda causa problemas. Segundo estudos de Ghaffar et al. (2018), quanto mais personalizado e complexo o design for, mais tempo o processo de impressão pode levar. Além disso, imprimir estruturas complexas, como sistemas de encanamento ou eletricidade integrados, ainda requer uma combinação de métodos tradicionais, o que pode afetar o tempo total da obra. Embora a impressão 3D seja um grande avanço, a integração com outros processos de construção pode ocasionalmente resultar em novos problemas de coordenação.

4.3 Sustentabilidade e Impacto Ambiental

Um dos principais benefícios apontados pela literatura sobre impressão 3D na construção civil é a sustentabilidade. O uso reduzido de materiais e a minimização de desperdícios são as principais contribuições da tecnologia para a sustentabilidade. Bos et al. (2016) afirma que a impressão 3D permite a deposição precisa dos materiais, eliminando assim o desperdício, que é um problema comum em métodos tradicionais que geralmente exigem ajustes e cortes.

Além disso, empresas como a Winsun na China estão trabalhando para usar materiais de impressão feitos de resíduos de construção reciclados, reduzindo ainda mais o impacto ambiental das construções. Oliveira et al. (2023) demonstraram que o uso de resíduos de construção e demolição (RCD) pode reduzir significativamente a pegada de carbono de estruturas impressas em 3D. Isso torna essa tecnologia uma opção viável para construções sustentáveis.

Mas também foram notados problemas de sustentabilidade. Como destacado por Gao et al., a operação de impressoras 3D em grande escala pode aumentar o consumo de energia. 2015. A impressão de estruturas de grande porte requer o uso de máquinas que consomem uma quantidade significativa de eletricidade. Além disso, nem sempre a rede elétrica local ou a fonte de energia utilizada é renovável, o que pode reduzir os ganhos em sustentabilidade. Além disso, como observado por Mechtcherine et al. (2020), a qualidade dos materiais reciclados usados na

impressão 3D continua a ser inconsistente, o que afeta o desempenho e a durabilidade da estrutura final.

Assim, embora a impressão 3D ofereça soluções promissoras para a sustentabilidade na construção civil, o impacto ambiental a longo prazo dependerá de avanços tecnológicos, principalmente na fabricação de materiais mais consistentes e sustentáveis e no uso de fontes de energia renováveis.

4.4 Durabilidade e Qualidade das Estruturas

A durabilidade das estruturas construídas com impressão 3D é um dos tópicos mais discutidos na literatura. Estudos, como os de Bos et al. (2016), mostram que, embora as estruturas impressas em 3D possam ter durabilidade comparável à das estruturas tradicionais, existe uma variação significativa entre os materiais e os métodos empregados.

Por exemplo, a impressão de concreto, uma técnica amplamente utilizada, tem a capacidade de criar estruturas que são extremamente duráveis. As pontes impressas em 3D na Europa, relatadas por Asprone et al. (2018), mostraram resistência estrutural comparável às pontes construídas por meio de técnicas convencionais.

Como observado por Khoshnevis (2004) e Wu et al. (2016), no entanto, a adesão entre camadas continua a ser um problema. A integridade estrutural das camadas impressas pode ser afetada por mudanças na temperatura, na umidade e até na composição do concreto, resultando em pontos de fraqueza que podem afetar a durabilidade a longo prazo.

Além disso, pesquisas, como Mechtcherine et al. (2020), indicam que a falta de reforço adequado nas estruturas impressas, como o uso de vergalhões de aço, pode tornar mais difícil para essas estruturas resistir a forças trativas e cargas altas. A incorporação de fibras ou outros materiais compósitos, como reforços, tem sido estudada, mas a viabilidade dessas soluções em larga escala ainda precisa de mais pesquisas.

Para garantir a segurança e a uniformidade das construções em 3D, o TCC enfatiza a criação de diretrizes específicas. Há o risco de que diferentes práticas resultem em variações na qualidade e na durabilidade, o que pode prejudicar a confiança na tecnologia se não houver padrões consistentes.

4.5 Desafios e Barreiras para a Implementação

Estudos como Wu et al. (2016) e Tay et al. (2017) mostraram que a implementação em larga escala da impressão 3D na construção civil enfrenta desafios significativos. A baixa

existência de regulamentação, de padrões técnicos padronizados e a resistência dos profissionais do setor à adoção de novas tecnologias são alguns dos principais obstáculos encontrados.

A falta de padrões específicos para a impressão 3D, conforme mencionado no TCC, dificulta a implementação da tecnologia em vários mercados. Para garantir que as construções atendam aos requisitos de segurança e qualidade exigidos pelos códigos de construção civil, a padronização é essencial.

Além disso, é difícil para os profissionais envolvidos no processo de impressão 3D receber a formação técnica adequada. A literatura indica que o desenvolvimento de treinamentos especializados para engenheiros, arquitetos e operários exige mais cooperação entre governos, indústrias e instituições acadêmicas.

O alto custo dos equipamentos e da infraestrutura necessários para a implementação da impressão 3D é um outro fator que limita o uso da impressão 3D. Embora a tecnologia ofereça benefícios significativos em termos de economias a longo prazo, os primeiros investimentos podem ser perigosos, especialmente em países em desenvolvimento, de acordo com o estudo de Barnett et al. (2019). Portanto, para facilitar a implementação da impressão 3D em mercados mais amplos, políticas públicas e incentivos financeiros devem ser criados.

De acordo com a revisão sistemática, a cooperação entre o governo e a indústria, será necessária para superar esses obstáculos. A implementação de políticas públicas que fomentem o uso de tecnologias emergentes, como a impressão 3D, em conjunto com a criação de padrões internacionais específicos, facilitará o acesso dessas tecnologias a vários mercados. Isso permitirá um avanço mais rápido na adoção da impressão 3D em projetos de larga escala, o que terá um impacto significativo no setor da construção civil.

Além disso, o desenvolvimento de tecnologias mais econômicas e sustentáveis é necessário, além de mais pesquisas sobre padronização e durabilidade dos materiais utilizados. Para que a impressão 3D na construção civil alcance seu potencial máximo, a introdução de programas de treinamento para capacitar profissionais da área, combinados com um esforço contínuo de regulamentação e incentivo financeiro, abrirá caminho. Isso mudará a forma como as construções são projetadas e construídas, reduzindo os custos, o tempo, a sustentabilidade e a durabilidade.

Por fim, a impressão 3D tem muito potencial para mudar a construção civil. Os estudos mostram que a tecnologia pode fornecer soluções inovadoras e mais eficientes, apesar dos grandes desafios de implementação. Conforme observado nesta revisão sistemática, a

impressão 3D pode se tornar uma ferramenta essencial para o futuro da construção civil, permitindo projetos mais rápidos, econômicos e sustentáveis.

5. CONCLUSÃO

A presente pesquisa teve como objetivo avaliar a viabilidade da impressão 3D na construção civil, com foco em suas implicações econômicas, impacto ambiental, durabilidade das estruturas e os desafios para sua implementação em larga escala. Através de uma revisão sistemática da literatura existente, foi possível identificar tanto os benefícios quanto as limitações dessa tecnologia emergente.

Os resultados indicam que a impressão 3D possui um potencial significativo para transformar a construção civil, principalmente em termos de redução de custos e tempo de construção. A tecnologia se destaca pela capacidade de reduzir o desperdício de materiais e otimizar o processo construtivo, o que pode resultar em obras mais econômicas e sustentáveis. Ademais, a impressão 3D oferece uma oportunidade única para incorporar materiais reciclados no processo construtivo, contribuindo para a diminuição do impacto ambiental das construções.

Contudo, a adoção da impressão 3D na construção civil ainda enfrenta barreiras consideráveis. Entre os principais desafios estão os elevados custos iniciais de investimento em equipamentos, a falta de normatização que garanta a qualidade e segurança das construções, e as questões técnicas relacionadas à durabilidade das estruturas construídas com essa tecnologia. Esses obstáculos são particularmente pronunciados em mercados emergentes, onde a resistência à mudança e o custo elevado representam barreiras significativas para a adoção generalizada.

Além disso, a revisão aponta que a impressão 3D, embora promissora, ainda não atingiu um estágio de maturidade tecnológica suficiente para substituir completamente os métodos tradicionais de construção. O desenvolvimento de normativas e regulamentações específicas é essencial para garantir a qualidade, segurança e aceitação dessa tecnologia no mercado global.

Diante disso, conclui-se que, enquanto a impressão 3D na construção civil apresenta um grande potencial de transformação, sua viabilidade em larga escala dependerá da superação dos desafios identificados. A colaboração entre indústria, governo e academia será crucial para o avanço dessa tecnologia, com a necessidade de investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, bem como na formação de profissionais capacitados para operá-la.

Para pesquisas futuras, sugere-se a investigação mais aprofundada sobre a durabilidade e a qualidade das construções em 3D, bem como a análise de casos práticos que explorem a aplicação da tecnologia em diferentes contextos. Além disso, seria valioso explorar estratégias para reduzir os custos de implementação e melhorar a eficiência energética das impressoras 3D.

Dessa forma, será possível não apenas validar a viabilidade da impressão 3D na construção civil, mas também maximizar os benefícios dessa inovação para o setor como um todo.

6. REFERÊNCIAS

- ARCHDAILY. **ICON conclui primeira casa de sua nova série de projetos com construção aditiva. 2022.** Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/978007/icon-conclui-primeira-casa-de-sua-nova-serie-de-projetos-com-construcao-aditiva>. Acesso em abril de 2024.
- ARCHDAILY. **Primeira comunidade de casas impressas em 3D para desabrigados está sendo construída no México. 2019.** Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/930694/primeira-comunidade-de-casas-impressas-em-3d-para-desabrigados-esta-sendo-construida-no-mexico>. Acesso em: abril de 2024.
- ARCHDAILY. **Impressão 3D em concreto funde artesanato tailandês e cria estruturas habitáveis. 2018.** Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/888825/impressao-3d-em-concreto-funde-artesanato-tailandes-e-cria-estruturas-habitaveis>. Acesso em: junho de 2024.
- ARCHDAILY. **Casa é construída com impressão 3D e argila na Itália. 2021.** Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/956414/casa-e-construida-com-impressao-3d-e-argila-na-italia>. Acesso em: junho de 2024.
- ARCHDAILY. **Dubai planeja empregar impressão 3D em 25% dos novos edifícios até 2025. 2018.** Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/901075/dubai-planeja-empregar-impressao-3d-em-25-percent-dos-novos-edificios-ate-2025>. Acesso em: abril de 2024.
- ASPRONE, D.; MENNA, C.; BOS, F. P.; SALET, T. A.; MATA-FALCÓN, J.; KAUFMANN, W. **Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders.** *Materials & Design*. p. 165. 2018.
- BARNETT, T.; GHAFAR, S. H.; MULLETT, J.; REES, D. **Large-scale construction 3D printing: The next big thing in the building industry?.** *Additive Manufacturing*. p. 28. 2019.
- BERMAN, B. **3D printing: The new industrial revolution.** *Business Horizons*. p. 155-162. 2012.
- BOS, F.; WOLFS, R.; AHMED, Z.; SALET, T. **Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing.** *Virtual and Physical Prototyping*. p. 209-225. 2016.
- BUSWELL, R. A.; SOAR, R. C.; GIBB, A. G. F.; THORPE, A. **Freeform construction: Mega-scale rapid manufacturing for construction.** *Automation in Construction*. p. 224-231. 2007.
- COR, A. **World's First Company to Develop a Mobile Construction 3D Printer. 2017.** Disponível em: <https://www.apis-cor.com/>. Acesso em: abril de 2024.

- CRUMP, S. S. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. Patent and Trademark Office. Washington, DC: U.S. p. 5,121,329. 1992.
- CYBE CONSTRUCTION. **3D Printing Office Buildings: Innovation and Efficiency in the UAE**. Journal of Additive Manufacturing. p. 45-52. 2019.
- DECKARD, C. **Method and apparatus for producing parts by selective sintering**. Patent and Trademark Office. Washington, DC: U.S. p. 4,863,538. 1989.
- DOMUS. **Primeira casa de impressão 3D no Brasil**. Macaíba, Rio Grande do Norte, 2021. Disponível em: <<https://www.instagram.com/domus3d.com.br/>>. Acesso em: maio de 2023.
- ESMAEILZADEH, R.; ROBERTS, S.; STRAUB, D. **Advanced automation in the construction industry: Current trends and future potential**. Construction Robotics. p. 1-12. 2020.
- GAO, W.; ZHANG, Y.; RAMANUJAN, D.; RAMANI, K.; CHEN, Y.; WILLIAMS, C. B., ZAVATTIERI, P. D. (2015). **The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering**. Computer-Aided Design. p. 65-89. 2015.
- GHAFFAR, S. H.; CORKER, J.; FAN, M. **Additive manufacturing technology and its implementation in the construction industry: A review**. Automation in Construction. p. 1-11. 2018.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing**. 2nd ed.. New York, NY: Springer. 2015.
- HULL, C. W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. Patent and Trademark Office. Washington, DC: U.S. 1986.
- INOVA SOCIAL. **Conheça maior bairro de casas impressas em 3D do mundo**. 2024. Disponível em: <https://inovasocial.com.br/tecnologias-sociais/maior-bairro-mundo-impresso-3d/>. Acesso em: junho de 2024.
- INSTITUTE FOR ADVANCED ARCHITECTURE OF CATALONIA. **3D-Printed Pedestrian Bridge**. 2016. Disponível em: <https://iaac.net/3d-printed-pedestrian-bridge/>. Acesso em: junho de 2024.
- ISO/ASTM 52939:2023. **Additive manufacturing — Qualification principles — Structural members for construction applications**. 2023. ISO/ASTM International.
- KHOSHNEVIS, B. **Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies**. Automation in Construction. p. 5-19. 2004.
- KLOFT, H.; BOS, F. **3D printing for sustainable construction: Potentials and challenges**. Procedia Engineering. p. 120-127. 2016.

- LABONNOTE, N.; RONNQUIST, A.; MANUM, B.; RUTHER, P. **Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities**. Automation in Construction. p. 347-366. 2016.
- LE, T.; AUSTIN, S. A.; LIM, S.; BUSWELL, R. A.; GIBB, A. G.; THORPE, T. **Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete**. Materials and Structures. p. 1221-1232. 2012.
- MECHTCHERINE, V.; NERELLA, V. N.; WILL, F. **3D printing of concrete: A continuous digital construction Revolution**. Cement and Concrete Research. 2020.
- MX3D. **3D Printed Bridge in Amsterdam**. Disponível em: <https://mx3d.com/3d-printed-bridge>. Acesso em: abril de 2024.
- NGO, T. D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K. T. Q.; HUI, D. **Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges**. Composites Part B: Engineering. p. 172-196. 2018.
- PERKINS, I.; SKITMORE, M. **Three-dimensional printing in the construction industry: A review**. International Journal of Construction Management. p. 1-9. 2015.
- PETRIE, C. J. **Habitat Design Concepts for Moon and Mars: A NASA Perspective**. Journal of Space Architecture. p. 41-52. 2020.
- SANTOS, Altair. **Projeto no RN constrói 1ª casa do Brasil com impressora 3D**. 2020. Disponível em: <https://www.cimentoitambe.com.br/projeto-no-rn-constroi-1a-casa-do-brasil-com-impressora-3d/>. Acesso em: maio de 2023.
- SENAI CIMATEC. **Projetos de pesquisa sobre impressão 3D no setor de construção**. 2021. Disponível em: <https://www.senaicimatec.com.br/noticias/senai-cimatec-hp-e-ska-se-unem-para-impulsionar-impressao-3d-para-industria/>. Acesso em: junho de 2024.
- TAY, Y. W. D.; PANDA, B.; PAUL, S. C.; NOOR MOHAMED, N. A.; TAN, M. J.; LEONG, K. F. **3D printing trends in building and construction industry: A review**. Virtual and Physical Prototyping. p. 261-276. 2023.
- TECNOBLOG. **Esta casa feita em impressão 3D foi levantada em 24 horas**. 2018. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/casa-impressora-3d/>. Acesso em: abril de 2024.
- THOMASSEN, A.; STUBBE, J. **Kamp C: The construction of Belgium's first 3D-printed house**. Journal of Sustainable Architecture. p. 24-30. 2020.
- TIBBITS, S. **4D printing: Multi-material shape change**. Architectural Design. p. 116-121. 2014.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Laboratório de Sistemas Estruturais e Tecnologia do Concreto**. Disponível em: <https://www.pcc.usp.br/post/visita-t%C3%A9cnica-aberta-ao->

p%C3%BAblico-no-laborat%C3%B3rio-de-impress%C3%A3o-3d-de-concreto-do-hubic.

Acesso em: junho de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. **Laboratório do curso de design.**

Disponível em: <https://www.arq.ufmg.br/ea/ensino/cursos/design/laboratorio-de-experimentacao-tridimensional-ea/>. Acesso em: julho de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **Universidade do Paraná recebe R\$ 1,2 milhão para estudar construção de casas com impressão 3D.** Disponível em:

<https://www.tribunapr.com.br/noticias/parana/universidade-do-parana-recebe-r-12-milhao-para-estudar-construcao-de-casas-com-impressora>. Acesso em: agosto de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Inovação na construção civil: impressão 3D.** Disponível em: <https://via.ufsc.br/inovacao-na-construcao-civil-impressao-3d/>.

Acesso em: agosto de 2024.

WINSUN. **China company 3D prints 10 houses in a day from recycled materials.** 2015.

Disponível em: <https://www.winsun3d.com/>. Acesso em: abril de 2024.

WOHLERS, T. **Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report. Fort Collins.** CO: Wohlers Associates. 2012.

WU, P.; WANG, J.; WANG, X. **A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry.** Automation in Construction. p. 21-31. 2016.

7. APÊNDICE

Formulário de Extração de Dados:

1. Informações Gerais do Estudo

Título do Estudo:

Autores:

Ano de Publicação:

País de Origem:

Tipo de Publicação:

Fonte:

2. Características Metodológicas

Objetivo do Estudo:

Questão de Pesquisa:

Metodologia:

Tipo de Estudo:

Amostra:

Tecnologia de Impressão 3D Utilizada:

Materiais Utilizados na Impressão:

Ferramentas Analíticas/Software Utilizado:

3. Resultados e Achados

Viabilidade Econômica:

Custos de Produção:

Economia de Material:

Tempo de Construção:

Sustentabilidade e Impacto Ambiental:

Uso de Materiais Reciclados:

Pegada de Carbono:

Energia Necessária:

Durabilidade e Qualidade das Estruturas:

Resistência Estrutural:

Qualidade do Produto Final:

Desafios e Limitações:

Barreiras Tecnológicas:

Custos Iniciais:

Regulamentação e Normatização:

4. Discussão e Conclusões

Principais Conclusões dos Autores:

Implicações para a Indústria da Construção:

Sugestões para Pesquisas Futuras:

Limitações do Estudo Identificadas pelos Autores:

5. Qualidade do Estudo

Nível de Evidência:

Conflito de Interesses:

Avaliação da Qualidade Metodológica:

6. Observações Adicionais

Notas e Comentários: