

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Humberto Pinto Bastian

**Automação na construção civil: o avanço das
impressoras 3D**

Abril de 2021



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Humberto Pinto Bastian

**Automação na construção civil: o avanço
das impressoras 3D**

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação do

Professor Doutor João Pedro Pereira Maia Couto

Abril de 2021

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por ter me dado a oportunidade desta vida e ter me colocado em uma família que sempre acreditou em mim.

Aos meu pais, Jorge Raul, Ester e Maria Cristina, e às minhas irmãs, Juliana e Isadora, obrigado por todo apoio e compreensão nestes anos em que estive longe, me dedicando aos estudos.

À minha companheira inseparável, Natália, que me ajudou nesta caminhada, me apoiando com suas palavras de incentivo e carinho.

Em especial, ao Dr. Frederico Seewald, por todos os conselhos que tornaram o sonho em sucesso. Obrigado por esta grande força.

Aos professores que tive durante este percurso, por todo conhecimento compartilhado. Foi um grande aprendizado.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

RESUMO

Automação na construção civil: o avanço das impressoras 3D

A manufatura aditiva (AM) é um processo de fabricação que consiste na criação de um objeto físico em três dimensões, através de impressão, camada sobre camada, de um modelo ou desenho digital. Este método, também conhecido como impressão 3D, vem ganhando atenção entre empresas, indústrias e universidades, de forma a impulsionar a indústria da construção com o investimento em novas e melhores tecnologias de automação. Todo esse esforço colaborativo tem ajudado a lançar inúmeras empresas iniciantes para explorar o potencial do processo AM, mas sua utilização ainda é muito reduzida. Esta tecnologia pode trazer benefícios significativos para a indústria da construção, tais como redução no tempo de construção, redução do número de colaboradores em canteiro de obra, redução de resíduos e de custos e aumento da qualidade do produto final. Tendo em vista toda a capacidade que essa tecnologia possui, este trabalho tem como objetivo apresentar, através de pesquisas em artigos científicos, livros e informações de sites, o progresso da indústria da construção com a utilização das impressoras 3D, bem como sua importância e perspectivas para o futuro desta tecnologia.

PALAVRAS-CHAVE

Construção civil; Construção automatizada; Indústria da construção; Impressão 3D; Manufatura aditiva.

ABSTRACT

Automation in civil construction: the advance of 3D printers

Additive manufacturing (AM) is a manufacturing process that consists of creating a physical object in three dimensions, through printing, layer upon layer, from a model or digital design. This method, also known as 3D printing, has been gaining attention among companies, industries and universities, in order to boost the construction sector with investment in new and better automation technologies. All this collaborative effort has helped to launch numerous start-ups to explore the potential of the AM process, but its use is still very limited. This technology can bring significant benefits to the construction industry, such as a reduction in construction time, a reduction in the number of employees on the onsite construction, a reduction in waste and costs and an increase in the quality of the final product. In view of all the capacity that this technology has, this work aims to present, through research in scientific articles, books and website information, the progress of the construction industry with the use of 3D printers, as well as its importance and perspectives for the future of this technology.

KEYWORDS

Additive manufacturing; Automated building; Civil construction; Construction industry; Print 3D.

ÍNDICE

Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vi
Índice	vii
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	x
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos	xi
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo geral	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Metodologia	3
1.4 Estrutura da dissertação	4
2. Estado da arte	5
2.1 Conceito	5
2.2 Breve história sobre as revoluções industriais	8
2.3 Breve história da automação na indústria da construção	9
2.4 Desafios e dificuldades na indústria da construção	12
2.5 Oportunidades na indústria da construção	21
3. O novo Corona Vírus e suas consequências na indústria da construção	28
3.1 Conceito de Corona Vírus (Covid-19)	28
3.2 Consequências do novo Corona Vírus na indústria da construção	28
4. Tecnologias AM	32
4.1 Potenciais e desvantagens da tecnologia AM	32
4.2 Processos AM	34
4.3 Métodos de impressão 3D na construção	35
4.3.1 Contour Crafting (CC)	35

4.3.2	D-Shape.....	36
4.3.3	Concrete Printing	39
4.3.4	Mesh Mould.....	41
4.3.5	Dfab	43
4.4	Modelos de impressoras 3D na construção.....	45
4.4.1	Contour Crafting Corporation (CC Corp.).....	45
4.4.2	D-shape®	47
4.4.3	CONPrint3D®.....	49
4.4.4	COBOD.....	50
4.4.5	Apis Cor.....	56
4.4.6	Sika®.....	57
5.	Os avanços e perspectivas da impressora 3D no mundo.....	59
5.1	Utilização da impressora 3D no mundo	59
5.2	Perspectivas para o futuro das impressoras 3D	62
6.	Revisão e fundamentos para a utilização de impressoras 3D.....	65
7.	Conclusões e trabalhos futuros.....	74
7.1	Conclusões	74
7.2	Trabalhos futuros	76
	Referências Bibliográficas	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de digitalização das indústrias	14
Figura 2 – Exemplo de rede de comunicação	19
Figura 3 – (a) Construção convencional utilizando tecnologias CC, (b) Construção de casas adobe utilizando tecnologias CC	36
Figura 4 – (a) camada de material granular depositado, (b) seção transversal do modelo impresso....	37
Figura 5 – Classificação de técnicas de impressão 3D em leito de pó na construção de concreto.....	38
Figura 6 – Figura esquemática das técnicas de impressão 3D em leito de partículas em construção..	39
Figura 7 – (a) Impressora Concrete Printing, (b) Modelo impresso com Concrete Printing.	40
Figura 8 – Comparação entre CC, D-Shape e Concrete Printing.	40
Figura 9 – (a) Cabeçote projetado para cortar, dobrar e soldar fios de aço, (b) Modelo impresso com Mesh Mould.....	43
Figura 10 – Telhado projetado em dfab - “The Sequential Roof”	44
Figura 11 – Moradias isoladas utilizando tecnologias CC	45
Figura 12 – Edifícios de vários andares utilizando tecnologias CC	46
Figura 13 – Estruturas grandes com várias unidades utilizando tecnologias CC.....	46
Figura 14 – Impressora 3D D-Shape.	48
Figura 15 – Modelo impresso por D-Shape.....	48
Figura 16 – Impressora CONPrint3D®.....	50
Figura 17 – Impressora BOD2.	51
Figura 18 – Processo de operação da Impressora BOD2.	52
Figura 19 – Estrutura modular da Impressora BOD2.	53
Figura 20 – Edifício BOD.....	54
Figura 21 – Projeto C2PO.	55
Figura 22 – Casa de demonstração do Projeto C2PO.	55
Figura 23 – (a) Impressora Apis Cor, (b) Modelo sendo construído com a impressora 3D Apis Cor.....	56
Figura 24 – Comparação do processo da construção tradicional com a impressão de construção 3D Apis Cor	57
Figura 25 – Modelo sendo construído com a impressora 3D da Sika®	58
Figura 26 – Índice de impressão 3D por país	60

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Dificuldades e desafios da indústria da construção.....	21
Tabela 2 – Impacto econômico da automação da construção pela Contour Crafting.....	47
Tabela 3 – Dificuldades e desafios supridos com o uso da impressora 3D	66

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

3D – Três dimensões

AM – Manufatura aditiva (Additive manufacturing)

BIM – Modelagem da informação de construção (Building information modeling)

CAD – Desenho assistido por computador (Computer – Aided design)

CC – Contour Crafting

Dfab – Fabricação digital aditiva (Additive digital fabrication)

EPI – Equipamento de Proteção Individual

IA – Inteligência Artificial

IoT – Internet das Coisas (Internet of Things)

OE – Ordem dos Engenheiros de Portugal

SLA – Estereolitografia

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho. A presente dissertação de mestrado intitulada “Automação na construção civil: o avanço das impressoras 3D” fornece uma revisão atualizada sobre as impressoras 3D - conhecidas também como tecnologias AM (Manufatura Aditiva) - no que se refere à indústria da construção.

Assumindo isto, espera-se estudar os motivos que levam as empresas a investirem ou não nesta tecnologia, quais as vantagens e oportunidades do emprego da tecnologia 3D na construção civil e quais são as atuais dificuldades e desafios. Também propõe-se identificar a tendência dos métodos relacionados à implementação da AM e possíveis avanços na sua aplicação.

O futuro desta tecnologia na indústria da construção é promissor e espera-se que este trabalho venha colaborar como base para pesquisas futuras de interessados sobre o assunto.

1.1 Enquadramento

A indústria da construção é a pedra angular da economia mundial. O ambiente da indústria da construção é de grande importância estratégica na economia, com receita anual de quase US\$10 trilhões (dez trilhões de dólares americanos) ou cerca de 6% do PIB (Produto Interno Bruto) global, atende a quase todas as outras indústrias, envolvendo a construção de edifícios, instalações de infraestrutura e outros ativos construídos (Gerbert et al., 2016).

A despeito desta relevância, estudos mostram que nas últimas décadas a indústria da construção está estagnado em todo o mundo. Este não foi capaz de acompanhar a produtividade econômica global. Diferentemente de outras indústrias, a indústria da construção vem retardando a adoção de novas tecnologias e nunca passou por uma grande transformação (Gerbert et al., 2016).

Segundo Mechtcherine et al. (2019), embora as ferramentas de design e planejamento digital, a exemplo do CAD (*Computer Aided Design* ou Desenho Auxiliado por Computador, traduzido para português) e do BIM (*Building information modeling*, ou Modelagem da informação de construção, traduzido para português), já estejam relativamente bem desenvolvidas e tenham sido cada vez mais comercializadas, ainda faltam os meios de fabricação digital e automatizada na prática real da construção.

Com o emprego desta prática, naturalmente o fluxo contínuo de dados do planejamento digital para a construção totalmente automatizada marcaria qualitativamente esse novo nível de tecnologia, geralmente

chamado de Indústria da Construção 4.0. Como o concreto domina a construção contemporânea ao mais alto grau e, como não se espera que isso mude nas próximas décadas, a digitalização e automação da construção em concreto devem ter a maior prioridade.

Visto desta forma, Investigações iniciais sugerem que o uso de impressora 3D, também conhecida como *Additive Manufacturing* (AM) ou Manufatura Aditiva, em português, tem o potencial de diminuir os custos de mão-de-obra, reduzir o desperdício de material e criar geometrias complexas personalizadas que são difíceis de alcançar usando técnicas convencionais de construção.

A Manufatura Aditiva foi introduzida, segundo Hamidi & Aslani, 2019, pela primeira vez em 1986, por Charles Hull, no processo de estereolitografia (SLA). Após isto, capturou a imaginação de todos, desde especialistas da indústria até amadores, sendo que a atenção da mídia ajudou a promover esta tecnologia além de todas as expectativas (Tibbits et al., 2014). Devido a demanda urgente de aceleração e mecanização na indústria da construção, minimizando os desperdícios e os custos relevantes, a tecnologia de impressão 3D foi sendo incorporada.

Após décadas, entretanto, ainda se observa pouca utilização desta tecnologia. Muitas razões para isso são oriundas de numerosos problemas, que incluem fatores como, por exemplo: resistência à introdução de novos métodos de produção em uma indústria altamente tradicional; baixo nível de industrialização dos processos de construção; debilitada colaboração das partes envolvidas e interoperabilidade de dados; e altos níveis de rotatividade, que ocasionam dificuldades de implementação de novos métodos (García de Soto et al., 2018). A introdução de novos métodos de produção depara-se com uma resistência por parte dos operários de obra, e demanda tempo no preparo dos mesmos para colocar em prática estas mudanças.

A indústria da construção está enfrentando desafios para melhorar a situação atual e aumentar a produtividade geral. Uma maneira de fazer isso poderia ser a adoção de elementos da tecnologia robótica, entre as quais sistemas de automação e robôs altamente autônomos.

Este estudo, portanto, concentra-se exatamente nesta abordagem, com o objetivo de esclarecer criticamente o estado de arte da tecnologia no cenário atual da indústria da construção, além de identificar as vantagens e desvantagens deste sistema construtivo e fundamentar a implementação das impressoras 3D na indústria da construção.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

A presente dissertação tem como principal objetivo identificar o progresso da indústria da construção com a utilização das impressoras 3D, bem como sua importância e perspectivas para o futuro desta tecnologia.

1.2.2 Objetivos específicos

Com vista a alcançar os objetivos gerais foram delineados diversos objetivos de caráter mais específico, designadamente:

- Caracterizar o estado atual da indústria da construção;
- Identificar as vantagens, dificuldades e os desafios do emprego da tecnologia das impressoras 3D na indústria da construção;
- Perceber a importância da automação para a inovação e modernização da construção;
- Identificar quais as perspectivas para o futuro desta tecnologia.
- Revisar e dar fundamento para implementação da tecnologia AM

1.3 Metodologia

O trabalho a ser desenvolvido seguiu os preceitos do estudo exploratório, por meio de uma pesquisa bibliográfica, ou seja, desenvolvido a partir de estudos e publicações já existentes, nomeadamente livros e artigos científicos (fontes secundárias), preferencialmente dentro da base de dados do Scopus e Web of Science, com avaliação Q1 e Q2, publicados nos últimos 3 anos.

Percebeu-se poucas referências bibliográficas sobre a automação na construção, especialmente sobre impressoras 3D aplicadas à indústria da construção. Por esta razão, buscou-se pesquisar em sites de empresas fabricantes e detentoras desta tecnologia voltada à construção civil, mas, ainda assim, elas também forneciam informações muito limitadas e restritas, refletindo uma grande confidencialidade de dados e detalhes sobre os funcionamentos e características das impressoras 3D.

Ressalta ainda que o estudo propunha uma investigação de campo, em laboratórios de empresas e de universidades as quais desenvolvem esta tecnologia, com propósito de obter informações mais apuradas à cerca deste assunto. Este estudo mais profundo ficou ausente neste trabalho, devido às circunstâncias

causadas pelo novo corona vírus, que fechou universidades, empresas e fronteiras entre regiões e países, impossibilitando, em consequência disso, acesso a estas informações de extrema importância para o presente trabalho.

Das informações recolhidas, a partir dos referenciais bibliográficos e sites das empresas de impressoras 3D, foi realizada uma análise de natureza descritiva para obter uma imagem mais elucidativa sobre esta tecnologia e de que forma ela pode ser empregada vantajosamente no cenário futuro da indústria da construção, reduzindo os problemas e desafios encontrados no sistema atual de construção.

1.4 Estrutura da dissertação

O próximo capítulo desta dissertação aborda o estado da arte das impressoras 3D, onde são apresentados alguns conceitos sobre a tecnologia AM e itens relevantes da história das revoluções industriais e da automação na indústria da construção. O mesmo capítulo ainda aborda os desafios e dificuldades atuais da indústria da construção e as suas oportunidades.

O capítulo terceiro trata sobre o novo corona vírus e suas consequências na indústria da construção. Na sequência, o quarto capítulo entra mais a fundo sobre as tecnologias AM, detalhando seus potenciais e suas desvantagens no cenário atual. Também descreve alguns processos AM e métodos de impressão 3D na construção mais conhecidos. Alguns modelos de impressoras 3D são apresentados como exemplos existentes no mercado.

O capítulo quinto apresenta uma análise que visa elucidar sobre os interesses e perspectivas na utilização das tecnologias AM no futuro. O sexto capítulo faz uma revisão sobre o assunto abordado no âmbito deste trabalho com o intuito de fundamentar e justificar a implementação das impressoras 3D na indústria da construção. Por fim, as conclusões finais deste trabalho são apresentadas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

Foram utilizadas como objeto de pesquisa para a realização deste trabalho as principais palavras chaves: construção civil, construção automatizada, indústria da construção, impressora 3D, manufatura aditiva, concreto aditivo, CONPrint3D.

Este estudo, portanto, concentra-se exatamente nesta abordagem com o objetivo de esclarecer criticamente o estado de arte da tecnologia no cenário da indústria da construção, além de identificar as vantagens e desvantagens deste sistema construtivo e fazer uma revisão para fundamentar a utilização das impressoras 3D na indústria da construção.

Através do levantamento bibliográfico, tanto em artigos publicados, como em sites específicos sobre o assunto, percebeu-se que as impressoras 3D na construção vem recebendo o respeito e a atenção entre empresas, indústrias, acadêmicos e publicações, de forma a impulsionar a indústria da construção com o investimento em novas e melhores tecnologias. Todo esse esforço colaborativo tem ajudado a lançar inúmeras empresas iniciantes para buscar as ferramentas AM. Mesmo assim, notou-se uma limitação de conteúdo mais explicativo e grande dificuldade em encontrar maiores detalhes sobre como funcionam as impressoras 3D na prática.

Importante destacar que a proposta do presente trabalho foi idealizada anteriormente à pandemia da Covid-19, mas diante da situação que estamos vivenciando, o assunto abordado neste trabalho tem ainda maior relevância.

Isto porque a paralisação das atividades e o confinamento obrigatório, resultado do novo coronavírus (assunto abordado em maior detalhe no capítulo 3) deixou claro a dependência da mão-de-obra humana presencial para grande parte dos serviços da indústria da construção, especialmente no canteiro de obras. Percebeu-se que a forma de trabalho ainda é a mesma de centenas de anos, baseada puramente no serviço braçal.

2.1 Conceito

O termo automação é um método que permite facilitar o trabalho ao executar tarefas de maneira automática, o que pode ser aplicado em diferentes aspectos de negócios seja comercial, industrial ou empresarial (IBM, n.d.).

Este termo é também conceituado como um sistema que emprega processos automáticos que comandam e controlam os mecanismos para seu próprio funcionamento. A palavra automação tem

origem do grego *αὐτόματον*, que significa autômatos em português, algo que se move por si. A automação faz uso de técnicas computadorizadas e/ou mecânicas com o objetivo de dinamizar e otimizar todos os processos produtivos dos mais diversos setores da economia. A ideia de automação está diretamente ligada à ideia de máquinas, que agilizam as tarefas quase sempre sem a interferência humana (Holanda, 2010).

Para criar um sistema de controle e automação, é necessário conhecer um processo de ponta a ponta e, para isso, pode-se mapear todo o processo e assim decidir quais partes podem e devem ser automatizadas de acordo com as necessidades do negócio (IBM, n.d.).

O controle e automação inteligente pode transformar todos os tipos de processos, tanto os simples quanto os complexos, auxiliando, desta forma, as empresas a enfrentarem desafios de forma estratégica. A colaboração entre o homem e a máquina torna-se otimizado, melhorando processos que impulsionam com maior eficiência e velocidade. Isto faz com que o uso de dados gere melhores resultados de negócios, aproveitando o poder destas tecnologias, como por exemplo, a IA (Inteligência Artificial) e a IoT (*Internet of Things* - Internet das Coisas) (IBM, n.d.).

Um método conhecido de automação na construção é a *Additive Manufacturing* (AM) ou Manufatura Aditiva, em português, comumente conhecida como impressora 3D. Segundo Schwab (2016), a impressão 3D consiste na criação de um objeto físico através de impressão, camada sobre camada, de um modelo ou desenho digital em 3D.

A impressão cimentícia de construção 3D, ou impressão 3D de concreto, é uma forma de manufatura aditiva usada para fabricar edifícios ou componentes de construção em formas completamente novas, não possíveis anteriormente com as formas de concreto tradicionais (SIKA, n.d.).

Considerada uma das mais inovadoras tecnologias para a produção de peças de alta complexidade, a AM tem sido um campo em rápida expansão, essencial para diversas indústrias, simplificando o processo de transformar um modelo 3D para um produto acabado. A AM fabrica componentes em camadas diretamente a partir de um arquivo digital. A AM é diferente dos processos de fabricação tradicionais, que são processos formativos que exigem a produção de um molde para fabricar um produto em quantidades maciças ou processos subtrativos que produzem quantidades significativas de material residual, à medida que um pedaço sólido é confeccionado na forma desejada (Delgado Camacho et al., 2018). Diferentemente, a impressão 3D começa com um material desarticulado e, em seguida, cria um objeto em três dimensões por meio de um modelo digital (Schwab, 2016).

A AM pode vantajosamente fabricar geometrias complexas personalizadas (que são difíceis utilizando técnicas da construção tradicional), sem necessidade de ferramentas específicas da peça em questão e muito menos de gerar material residual, preenchendo uma lacuna deixada pelos outros processos de fabricação (Delgado Camacho et al., 2018). Com isso, tem o potencial de diminuir os custos de mão de obra e de reduzir o desperdício de material (Delgado Camacho et al., 2018). Estas lacunas potenciais existentes na construção serão abordadas mais adiante, no capítulo 2.4, nomeadamente “desafios e dificuldades na indústria da construção”.

Ao contrário dos bens manufaturados produzidos em massa, os produtos impressos em 3D podem ser facilmente personalizados. As restrições atuais em relação a tamanho, custo e velocidade serão progressivamente superadas (Schwab, 2016).

Essa tecnologia possui uma ampla gama de utilizações, desde grandes (como exemplo as turbinas eólicas) até as pequenas (implantes médicos, por exemplo). Atualmente seu uso limita-se principalmente às indústrias automotivas, aeroespaciais e médicas (Schwab, 2016). Com base nos avanços da AM nessas indústrias, existem várias aplicações experimentais da AM na indústria da construção (Delgado Camacho et al., 2018), porém tem tido uma implementação mais lenta principalmente devido às grandes escalas envolvidas e às complexidades física e química dos materiais usados.

Existem diversos materiais sendo utilizados para impressão 3D. O mais utilizado na construção atualmente é o concreto, mas são também utilizados metais e polímeros, por exemplo. O cimento alcançou muito sucesso na indústria da construção e continua sendo o componente dominante da construção, pois apresenta muitas características atraentes. Comparado a outros materiais, o cimento é barato e abundante, produzido em quase todos os países do mundo (Hamidi & Aslani, 2019).

O concreto polimérico também tem um grande potencial na indústria da construção. À medida que a conscientização sobre o problema do plástico se espalha, os concretos poliméricos podem ajudar a reduzir a quantidade de lixo plástico nos aterros e oceanos do planeta. Garrafas de plástico podem ser recicladas para formar concreto de polimérico mais resistente que o concreto convencional, fornecendo melhores materiais de construção e, ao mesmo tempo, reduzindo a quantidade de plástico descartado e diminuindo as emissões de carbono da indústria de cimento (AUTODESK, 2019).

O processo de impressão 3D com concreto é geralmente baseado na deposição seletiva do material por extrusão, no qual o concreto fresco pré-misturado é colocado por um cabeçote de impressão na forma de filamentos contínuos ou descontínuos, de acordo com as coordenadas fornecidas pelos dados de planejamento digital e velocidade de operação cinemática da impressora (Mechtcherine et al., 2019).

O termo extrusão significa que o fluxo de material através do cabeçote de impressão é controlado por dispositivos mecânicos, que por sua vez são controlados pelo algoritmo de impressão (Mechtcherine et al., 2019).

Para compreender melhor o surgimento da automação e das impressoras 3D, o assunto da seção seguinte aborda uma breve história sobre as revoluções industriais.

2.2 Breve história sobre as revoluções industriais

O mundo presenciou diversas mudanças desde a primeira revolução industrial. A palavra “revolução” denota mudança abrupta e radical. Em nossa história, as revoluções têm ocorrido quando novas tecnologias e novas formas de perceber o mundo desencadearam uma alteração profunda nas estruturas sociais e nos sistemas econômicos (Schwab, 2016).

A primeira mudança profunda aconteceu a cerca de 10 mil anos atrás, a chamada revolução agrícola, que combinou a força dos animais à dos seres humanos em benefício da produção, do transporte e da comunicação. Isso estimulou o crescimento da população e conseqüentemente o surgimento das cidades (Schwab, 2016).

A revolução agrícola foi seguida por uma série de revoluções industriais iniciadas na segunda metade do século XVIII. A marca dessas revoluções foi a transição da força muscular para a energia mecânica, a qual evolui até a atual quarta revolução industrial (Schwab, 2016).

A primeira revolução industrial ocorreu aproximadamente entre 1760 e 1840. Provocada pela construção das ferrovias e pela invenção da máquina à vapor, ela deu início à produção mecânica (Schwab, 2016).

A segunda revolução industrial, iniciada no final do século XIX, entrou no século XX e, pelo advento da eletricidade e da linha de montagem, possibilitou a produção em massa (Schwab, 2016).

A terceira revolução industrial começou na década de 1960. Ela costuma ser chamada de revolução digital ou do computador, pois foi impulsionada pelo desenvolvimento dos semicondutores, da computação em *mainframe* (década de 1960), da computação pessoal (década de 1970 e 1980) e da internet (década de 1990) (Schwab, 2016). O termo *mainframe* significa um computador de grande porte dedicado normalmente ao processamento de um volume enorme de informações.

Muitos argumentos científicos e acadêmicos acreditam que estamos atualmente no início da quarta revolução industrial, a qual baseia-se na revolução digital. É caracterizada por uma internet mais ubíqua

e móvel, por sensores menores e mais poderosos, que se tornaram mais baratos, e pela inteligência artificial e aprendizagem automática (ou aprendizado de máquina) (Schwab, 2016).

As tecnologias digitais, fundamentadas no computador, no software e nas redes, não são novas, mas estão causando rupturas à terceira revolução industrial. Estão se tornando mais sofisticadas e integradas e, conseqüentemente, transformando a sociedade e a economia global (Schwab, 2016).

A quarta revolução industrial, no entanto, não diz respeito apenas a sistemas e máquinas inteligentes e conectadas. Seu escopo é muito mais amplo. Ondas de novas descobertas ocorrem simultaneamente em áreas que vão desde o sequenciamento genético até a nanotecnologia, das energias renováveis à computação quântica. O que torna a quarta revolução industrial fundamentalmente diferente das anteriores é a fusão dessas tecnologias e a interação entre os domínios físicos, digitais e biológicos (Schwab, 2016).

Segundo Schwab (2016), “estamos no início de uma revolução que alterará profundamente a maneira como vivemos, trabalhamos e nos relacionamos”. Portanto, ainda é preciso compreender de forma mais abrangente a velocidade e a amplitude dessa nova revolução, com possibilidades ilimitadas de bilhões de pessoas conectadas por dispositivos móveis, dando origem a um poder de processamento, recursos de armazenamento e acesso ao conhecimento sem precedentes. Além das novidades tecnológicas que abrangem numerosas áreas: inteligência artificial (IA), robótica, a internet das coisas (IoT, na sigla em inglês), veículos autônomos, impressão em 3D, nanotecnologia, dentre outras.

Entrando mais a fundo no assunto deste presente trabalho, a seção seguinte aborda uma breve história da automação na indústria da construção.

2.3 Breve história da automação na indústria da construção

Embora alguns possam pensar que o uso da robótica na construção seja um novo desenvolvimento, é, na verdade, a continuação de uma história maior sobre automação na construção que tem origem há milhares de anos.

O Exército de Terracota é uma coleção de esculturas em terracota que retratam o exército do primeiro imperador da China, Qin Shi Huang. Este exército utilizou técnicas de construção e pré-fabricação fora do local de construção, em 210 A.C. (AUTODESK, 2019).

Já no século passado houve diversas tentativas de industrializar a construção, desde a “Sears Modern Home”, um catálogo e um conjunto de componentes para construção de casas, vendidos pela empresa

Sears, Roebuck and Company por correspondência. Assim como, também existem as casas denominadas Lustron (*Lustron Homes*), que são casas pré-fabricadas em aço esmaltado, desenvolvidas após a Segunda Guerra Mundial nos Estados Unidos da América do Norte, em resposta à escassez de casas para o retorno dos soldados. Essas casas eram transportadas por vagões ferroviários e montadas no local (AUTODESK, 2019). Foram criadas pelo industrial e inventor Carl Strandlund, de Chicago, com o objetivo de atrair famílias modernas que não possuíam tempo ou interesse para fazer manutenção, consertos e pinturas, necessários nas casas convencionais de madeira e alvenaria.

No final dos anos 70 e 80 assistiu-se a um rico período de desenvolvimento impulsionado pela indústria, particularmente no Japão. Enfrentando temores de uma escassez de mão de obra, não somente devido ao envelhecimento da população, como também aos jovens trabalhadores migrando para indústrias de alta tecnologia (receios ainda hoje relevantes), várias empresas japonesas, como *Shimizu Corporation* e *Takenaka Corporation*, investiram em automação e robótica na construção, com grande efeito. Desenvolveram robôs e dispositivos controlados remotamente, utilizados para todos os tipos de tarefas, incluindo manuseio de materiais, escavação, colocação de concreto, acabamento de concreto, colocação de vergalhões, proteção contra fogo, aço estrutural, acabamento interior e exterior, terraplenagem, bem como sistemas integrados de automação de construção e casas pré-fabricadas (AUTODESK, 2019).

Embora muitas destas tecnologias não tenham sido amplamente adotadas, incorporaram com sucesso técnicas desde a fabricação até a utilização prática da construção. Hoje, as melhorias em robótica, software e organização permitiram o surgimento de uma nova onda de automação na construção, com novos desenvolvimentos e colaborações acontecendo através da universidade, governo e indústria (AUTODESK, 2019).

A indústria de construção é a pedra angular da economia mundial. A construção civil é vista como uma indústria de grande importância estratégica na economia, com receita anual de quase US\$10 trilhões (dez trilhões de dólares norte americanos) ou cerca de 6% do PIB (Produto Interno Bruto) global, atende a quase todas as outras indústrias, envolvendo a construção de edifícios, instalações de infraestrutura e outros ativos construídos (Gerbert et al., 2016).

No entanto, estudos mostram que nas últimas décadas a indústria da construção está estagnada em todo o mundo, pois não foi capaz de acompanhar a produtividade econômica geral. Diferentemente de outras indústrias, a indústria de construção vem retardando a adoção de novas tecnologias e nunca passou por uma grande transformação (Gerbert et al., 2016).

Segundo Mechtcherine et al. (2019), embora as ferramentas de design e planejamento digital, a exemplo do CAD (*Computer Aided Design* ou Desenho Auxiliado por Computador, traduzido para português) e BIM (*Building information modeling*, ou Modelagem da informação de construção, traduzido para português), já estejam relativamente bem desenvolvidas e tenham sido cada vez mais comercializadas, ainda faltam os meios de fabricação digital e automatizada na prática real da construção.

Com o emprego desta prática, naturalmente o fluxo contínuo de dados do planejamento digital para a construção totalmente automatizada marcaria qualitativamente esse novo nível de tecnologia, geralmente chamado de Indústria da Construção 4.0. (Mechtcherine et al., 2019).

Como o concreto domina a construção contemporânea ao mais alto grau e, como não se espera que isso mude nas próximas décadas, a digitalização e automação da construção em concreto devem ter a maior prioridade (Mechtcherine et al., 2019).

Sendo assim, investigações iniciais sugerem que o uso de impressora 3D, também conhecida como *Additive Manufacturing* (AM) ou Manufatura Aditiva, em português, tem o potencial de diminuir os custos de mão-de-obra, reduzir o desperdício de material e criar geometrias complexas personalizadas que são difíceis de alcançar usando técnicas convencionais de construção (Mechtcherine et al., 2019).

A Manufatura Aditiva foi introduzida, segundo Hamidi & Aslani (2019), pela primeira vez em 1986, por Charles Hull, no processo de estereolitografia (SLA). Após isto, capturou a imaginação de todos, desde especialistas da indústria até amadores, sendo que a atenção da mídia ajudou a promover esta tecnologia além de todas as expectativas (Tibbits et al., 2014). Devido a demanda urgente de aceleração e mecanização na indústria da construção, minimizando os desperdícios e os custos relevantes, a tecnologia de impressão 3D foi incorporada.

Os setores aeroespacial, automotivo e da saúde já vêm explorando os benefícios do uso da AM em seus negócios. As aplicações iniciais focaram na prototipagem rápida, a fim de reduzir o tempo necessário para produzir protótipos com geometrias complexas. Desde então, a AM evoluiu para incluir muitos tipos de peças funcionais de uso final (Delgado Camacho et al., 2018).

Aplicações iniciais de AM na indústria da construção começaram a aparecer no final dos anos 90 (Delgado Camacho et al., 2018), ainda que, após décadas, se observe pouca utilização desta tecnologia (García de Soto et al., 2018). Muitas razões são oriundas de numerosos problemas, que incluem fatores como: resistência à introdução de mudanças em uma indústria altamente tradicional, baixa industrialização dos processos de construção, baixa colaboração e interoperabilidade de dados e altos

níveis de rotatividade, que ocasionam dificuldades de implementação de novos métodos (García de Soto et al., 2018).

A indústria da construção está enfrentando desafios para melhorar a situação atual e aumentar a produtividade geral. Uma maneira de fazer isso poderia ser a adoção de elementos da indústria da tecnologia, entre as quais sistemas de automação e robôs altamente autônomos.

A indústria da construção apresenta numerosos desafios e dificuldades, que poderão ser minimizados com a utilização de sistemas de automação e robôs autônomos e é o assunto que a seção seguinte aborda.

2.4 Desafios e dificuldades na indústria da construção

Pesquisas realizadas destacam diversas dificuldades e desafios que a indústria da construção enfrenta atualmente, os quais são detalhados nesta seção.

A indústria da construção é composta por empresas de construção, as quais são divididas em setores, onde o cronograma de produção começa pela criação e desenvolvimento dos projetos, em ambiente de escritório, com alta tecnologia digital e com profissionais capacitados - engenheiros, arquitetos, projetistas, e todo pessoal de apoio administrativo.

Na maioria das vezes os projetos de construção não são executados no principal local de negócios da organização, podendo ser executados em ambientes remotos, às vezes hostis, em mar aberto, sob a superfície da terra e elevando-se no céu (Project Management Institute, 2016).

Nestes ambientes de obras predominam ainda técnicas e ferramentas rudimentares, ultrapassadas, perigosas, insalubres e que exigem grandes esforços físicos. Esta imagem negativa da construção civil é intensificada pelo fato de atividades de risco serem executadas por trabalhadores de baixa escolaridade e não usarem muitas vezes os equipamentos de proteção adequados.

A construção civil, no Brasil e em muitos outros países, foi e ainda é composta por trabalhadores oriundos do interior, os quais muitas vezes trabalhavam com agricultura e pecuária. Portanto, sem experiência alguma na construção civil. As consequências disto são serviços de baixa qualidade, altos riscos de acidente de trabalho, desperdício de tempo e de material.

Inerentemente, os projetos de construção ocorrem em um ambiente complexo e em constante mudança, e geralmente com um alto grau de risco. Cada projeto, seja edifícios, rodovias, unidades residenciais,

instalações de saúde, infraestruturas de serviços públicos, petróleo e gás ou outras instalações industriais - apresenta seus próprios desafios e riscos (Project Management Institute, 2016).

Quando a construção em ambientes agressivos é inevitável, as dificuldades e os riscos aumentam, afetando adversamente a qualidade da construção e a segurança humana. Por exemplo, trabalhar em temperaturas congelantes pode apresentar desafios em escavações ou vazamentos de concreto, já em ambientes com temperaturas muito altas pode causar desidratação nos trabalhadores da construção, e em locais expostos à contaminação química ou nuclear pode representar sérios riscos à saúde humana (Delgado Camacho et al., 2018).

É visível o desequilíbrio da cadeia produtiva, quando se tem um grande desnível de preparo e escolaridade entre arquitetos, engenheiros e projetistas, por exemplo, e os operários de obra. Toda tecnologia criada para executar um projeto, ao colocá-lo em prática, se depara com uma outra realidade e numa mão de obra precária, demandando tempo inclusive na transferência de conhecimento.

Houve um grande crescimento tecnológico para a criação e desenvolvimento de projetos de construção com o advento da tecnologia digital, enquanto que no ambiente em que estes projetos são executados é onde grande parte do capital empregado pelos investidores com recursos para execução das obras, está a mercê de uma classe operária precária.

A indústria da construção tem demorado a adotar inovações tecnológicas e digitalização, embora uma série de novas soluções já tenham sido desenvolvidas para a indústria, ficando muito atrás em relação a outras indústrias. Sem contar que ainda se precisa consertar o básico, como exemplos: o planejamento do projeto permanece descoordenado entre o escritório e a obra, além de ser feito geralmente em papel, o que prejudica a comunicação da equipe dispersa geograficamente que pode chegar com atraso - se chegar. Acontece de forma frequente proprietários e empreiteiros trabalharem com versões diferentes da realidade (McKinsey&Company, 2016).

Uma das razões para a baixa produtividade da indústria da construção é que ela ainda depende muito do papel para gerenciar processos e produtos, como por exemplo projetos, desenhos, compras, pedidos da cadeia de suprimentos, registros de equipamentos, relatórios de progresso diário e listas de pendências. A utilização de papel torna difícil capturar e analisar dados, demandando mais tempo, além de que, uma quantidade alta de papel mal gerenciado leva à perda de informações importantes (McKinsey&Company, 2016).

Conforme os projetos ficam cada dia mais complexos e maiores em escala, a falta de digitalização e novas tecnologias para agilizar processos, torna tudo mais complicado. São questões profundas que exigem novas formas de pensar e trabalhar (McKinsey&Company, 2016).

A figura seguinte mostra o índice de digitalização das indústrias no ano de 2015, com base num conjunto de métricas para avaliar a digitalização de ativos, uso e mão de obra, onde a cor vermelha indica uma digitalização relativamente baixa e a cor verde indica uma digitalização relativamente alta. Como pode-se verificar, a construção está entre os setores menos digitalizados, ficando atrás somente da agricultura e caça.

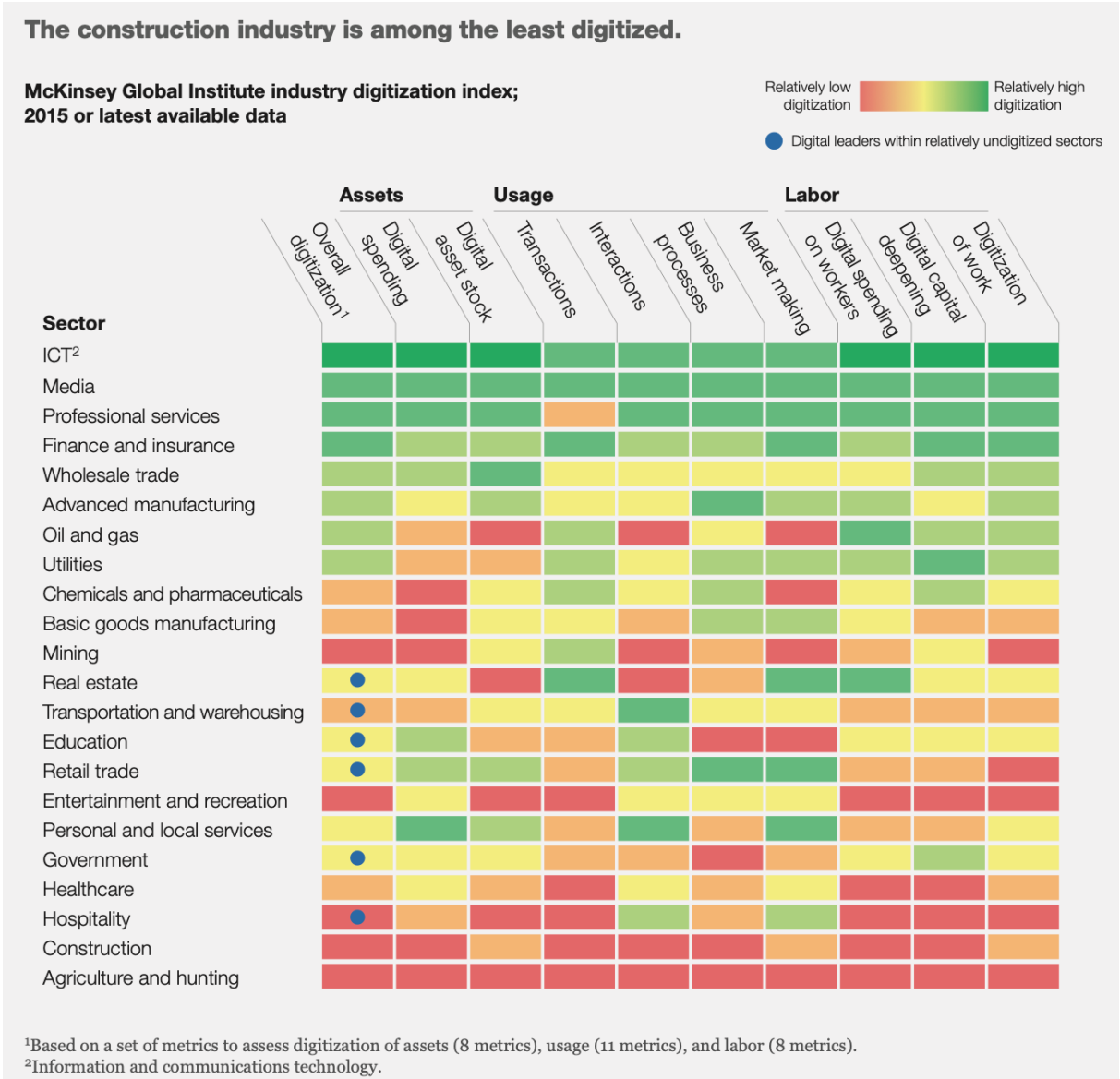


Figura 1 – Índice de digitalização das indústrias (McKinsey&Company, 2016)

Além desta falta de digitalização, está a junção de especialistas e contratados da equipe. Por exemplo, os projetos de construção geralmente exigem a integração de disciplinas de engenharia (civil, elétrica, mecânica, geotécnica etc.), bem como a interação com a tecnologia e equipamentos sofisticados que exigem técnicas e métodos de construção exclusivos (Project Management Institute, 2016).

Isso pode contribuir para acordos exclusivos de subcontratação, financiamento especial, seguro de risco, cronogramas compactos, infraestrutura sustentável, logística complexa, adaptação às regulamentações governamentais em vigor e restrições internas/externas, potencializando aumentos significativos nos custos de projeto (Project Management Institute, 2016).

A indústria da construção é quase inteiramente baseada em um ambiente de mercado competitivo para entrega de custo, cronograma e desempenho do projeto. Os projetos de construção estão se tornando cada vez maiores, mais complexos e mais competitivos globalmente, cada um com uma potencial relação contraditória entre compradores e vendedores (Project Management Institute, 2016).

Nesta competitividade no mercado da construção, a empresa que souber otimizar a sua produção - isto quer dizer, produzir mais, com menos recursos, mais qualidade e em menos tempo - vai se destacar frente aos concorrentes, ganhando força no mercado.

Com um grande número de pequenas e médias empresas especializadas em construção, muitas são cautelosas em compartilhar conhecimentos ou tecnologias vantajosas com outras, sufocando ainda mais as inovações em potencial na indústria (Delgado Camacho et al., 2018).

Outro problema grave e de extrema relevância é que a construção é uma das maiores indústrias geradoras de resíduos do mundo. Embora seja difícil obter números exatos dos resíduos produzidos em um canteiro de obra típico, alguns estimam que até 30% do peso total dos materiais de construção entregues a um canteiro são desperdiçados. De acordo com o Grupo de Discussão em Sustentabilidade do Instituto Americano de Arquitetos (AIA) (2008), 25% a 40% do total de resíduos são provenientes de edifícios, os quais consomem 40% da energia global e 40% das matérias-primas do mundo. Somente a escala de desperdício de material nos processos atuais de construção é uma questão importante a ser abordada (AUTODESK, 2019).

Isto é inadmissível nos tempos atuais, em se tratando de toda evolução de centenas de anos da indústria construção em diversas áreas - tanto a nível de projeto, estrutural e arquitetônico, quanto infraestrutura nas obras - ainda continuar com este tipo de desperdício de recursos nos canteiros de obra, mostrando com clareza que o método de produção não tem acompanhado esta evolução como tiveram as outras áreas.

Sem contar que por trás de todo este desperdício de materiais, existe um tempo e esforço gerados, refletindo no aumento do custo de uma obra e trazendo ônus aos investidores na ótica de negócio.

Além disso, o aumento da população em áreas como a África Subsaariana e a Índia indica que uma grande porcentagem de projetos de construção no futuro próximo precisará ser construída em áreas com poucos recursos, onde as cadeias de suprimentos são inexistentes ou subdesenvolvidas. Com uma população em rápido crescimento em um mundo de recursos cada vez mais escassos, a indústria da construção precisará encontrar maneiras de construir mais com menos (AUTODESK, 2019).

Atualmente a indústria da construção enfrenta uma série de desafios relacionados ao trabalho. A construção continua atrasada em relação a outras indústrias em produtividade do trabalho, classificando continuamente com índices relativamente baixos de produtividade do trabalho - índices de produtividade medem o tempo que uma pessoa gasta no local de trabalho em relação a quantidade de produção alcançada (AUTODESK, 2019).

Embora exista grande dificuldade na medição da produtividade do trabalho na construção e tenha sido motivo de debate, a US Bureau of Labor Statistics sugere que a construção, além de não estar subindo ao nível de outras indústrias, em alguns casos a produtividade está em declínio há muitas décadas. Embora medições mais recentes indiquem que o problema pode não ser tão negativo quanto se pensava anteriormente, a construção ainda está atrasada em relação a outras indústrias (AUTODESK, 2019).

Grandes projetos em todas as classes de ativos geralmente levam 20% a mais do tempo programado para terminar e estão acima do orçamento em até 80%. A produtividade da construção diminuiu em alguns mercados e os retornos financeiros para os empreiteiros costumam ser relativamente baixos e voláteis (McKinsey&Company, 2016).

Os projetos de construção geralmente sofrem grandes multas ou danos por projetos concluídos com atraso. Os riscos inerentes aos projetos de construção, aliados a esses danos relacionados ao tempo, geraram a necessidade de várias áreas de conhecimento a serem implementadas com maior destaque como diversos serviços especializados que demanda uma obra de qualidade superior. Esse subconjunto de gerenciamento de construção, conhecido como controle de projeto, inclui disciplinas tecnicamente avançadas de planejamento e programação, gerenciamento de custos, gerenciamento de riscos, controles de documentos e análise forense. Os serviços de controle de projeto provaram ser um componente forte no sucesso de um projeto (Project Management Institute, 2016).

Em se tratando de baixa produtividade, levanta-se a questão de que os projetos de construção geralmente resultam em um produto único e não em produtos produzidos em massa. Embora muitas vezes não haja

oportunidade para produzir um protótipo, um projeto de construção pode ser realizado em fases, a fim de fornecer uma oportunidade para revisar e refinar a estratégia de design e implementação do projeto, bem como validar a intenção de investimento (Project Management Institute, 2016).

Além de projetos de construção resultarem em um produto único e exclusivo, os projetos de construção produzem uma variedade de produtos como, por exemplo (Project Management Institute, 2016):

- Instalações que fabricam ou abrigam os meios para fabricar produtos, como complexos de fabricação ou montagem;
- Instalações públicas, como barragens, rodovias, pontes, águas residuais e sistemas de abastecimento de água, aeroportos, ferrovias, instalações de entretenimento, museus e parques da cidade;
- Instalações de serviços, como centros médicos, campus educacionais para escolas e faculdades, portos marítimos e estações ferroviárias;
- Torres de escritórios, empreendimentos urbanos e unidades residenciais, comunidades e sua infraestrutura associada, incluindo estradas, passeios e serviços públicos;
- Infraestruturas específicas conhecidas como utilidades que fornecem água, eletricidade, combustível e telecomunicações; e
- Megaprojetos, como construção baseada em eventos para Olimpíadas ou outras superestruturas e megacidades.

Para criar esses diversos produtos, os projetos de construção seguem os regulamentos e os requisitos jurisdicionais (locais, globais ou específicos do setor) em que o projeto será executado, por exemplo, leis cívicas e códigos de construção (Project Management Institute, 2016).

Além disso, a indústria da construção está preocupada em melhorar os fatores sociais, econômicos e ambientais de sustentabilidade, confiabilidade e bem-estar das comunidades afetadas. Uma equipe multidisciplinar de especialistas em finanças, seguros, jurídico, design, segurança e engenharia; equipes de construção de vários negócios; e uma cadeia de suprimentos eficiente de materiais e equipamentos, é necessária para a entrega do projeto (Project Management Institute, 2016).

Vários fatores contribuem para a complexidade do ambiente de construção. Isso inclui avanços tecnológicos e seu impacto na aplicação do gerenciamento de projetos, mudanças no ambiente da construção através do desenvolvimento de novos equipamentos e de materiais de construção, além da

magnitude das partes interessadas com suas diferentes expectativas em relação ao projeto (Project Management Institute, 2016).

A complexidade pode não ser imediatamente aparente quando um projeto de construção começa. A equipe de desenvolvimento deve analisar cuidadosamente o projeto para determinar as complexidades do impacto das partes interessadas e a ambiguidade potencial do projeto (por exemplo, a possibilidade de problemas ou situações emergentes devido ao feedback e às características das inter-relações das partes interessadas) antes de confirmar os compromissos de escopo, tempo, qualidade, segurança e custo. A análise deve integrar o gerenciamento de riscos para minimizar os impactos e melhorar as oportunidades de sucesso. Caso contrário, um projeto pode resultar em um escopo de trabalho incerto, em uma metodologia inadequada para execução da construção e em um ambiente incerto, podendo falhar na data oportuna de conclusão e na expectativa de orçamento (Project Management Institute, 2016).

A indústria da construção tende a ser muito fragmentada (Delgado Camacho et al., 2018). Navegar nos fluxos de trabalho de uma equipe de projeto em uma única organização é um desafio por si só. Navegar nos fluxos de trabalho entre vários participantes do projeto (por exemplo, proprietários, desenvolvedores, designers, engenheiros, contratados, fornecedores de produtos e agências governamentais) expande a complexidade desse desafio.

Além disso, outras questões tornam a construção infinitamente mais complexa, tais como: diferentes sistemas organizacionais; interfaces entre componentes; grandes equipamentos em espaços de trabalho confinados, com várias equipes de trabalho próximas; extenso detalhamento e complexidade dos elementos; coordenação eficiente; controle; e monitoramento (Project Management Institute, 2016).

Fortes evidências de pesquisas na indústria da construção revelam que um dos fatores que causam falhas nos projetos de construção decorre de decisões tomadas na fase de engenharia e design, no momento da execução do projeto. Apesar de sua importância, os problemas, as responsabilidades, as funções e as ações de gerenciamento, no momento da execução do projeto, podem não receber a atenção necessária. As pressões públicas e ambientais estão mudando essa perspectiva, à medida que se busca mais atenção na forma de construção, sustentabilidade e confiabilidade não apenas do produto acabado, mas também dos meios e métodos para o seu desenvolvimento (Project Management Institute, 2016).

A comunicação em ambiente de construção apresenta desafios especiais devido ao alto número de pessoas que se reúnem por curtos períodos de tempo e devido à natureza interdisciplinar das equipes

de projeto. Diversos fatores contribuem para a distorção das informações transmitidas, tais como: a natureza dinâmica dos projetos de construção; a distância entre o escritório central da organização e o canteiro de obras do projeto; o idioma técnico; o contexto organizacional e cultural; dentre muitos outros (Project Management Institute, 2016).

O gerenciamento das comunicações e dos documentos correspondentes requer um esforço consistente e um plano de comunicação que cubra as necessidades das partes interessadas e seus níveis de entendimento. O fluxo de informações terá níveis e conteúdos diferentes, dependendo dos destinatários e de suas responsabilidades no projeto. As comunicações entre as partes interessadas no projeto, se não controladas, podem ter um efeito sério no custo e no cronograma de um projeto, e levar a reclamações (Project Management Institute, 2016).

A Figura seguinte mostra um exemplo de rede de comunicação na construção, onde cada equipe possui redes secundárias que interagem entre si e com a rede do proprietário do projeto, o que aumenta o total de potenciais canais de comunicação, tornando complexo e desafiante atender às necessidades dos projetos.

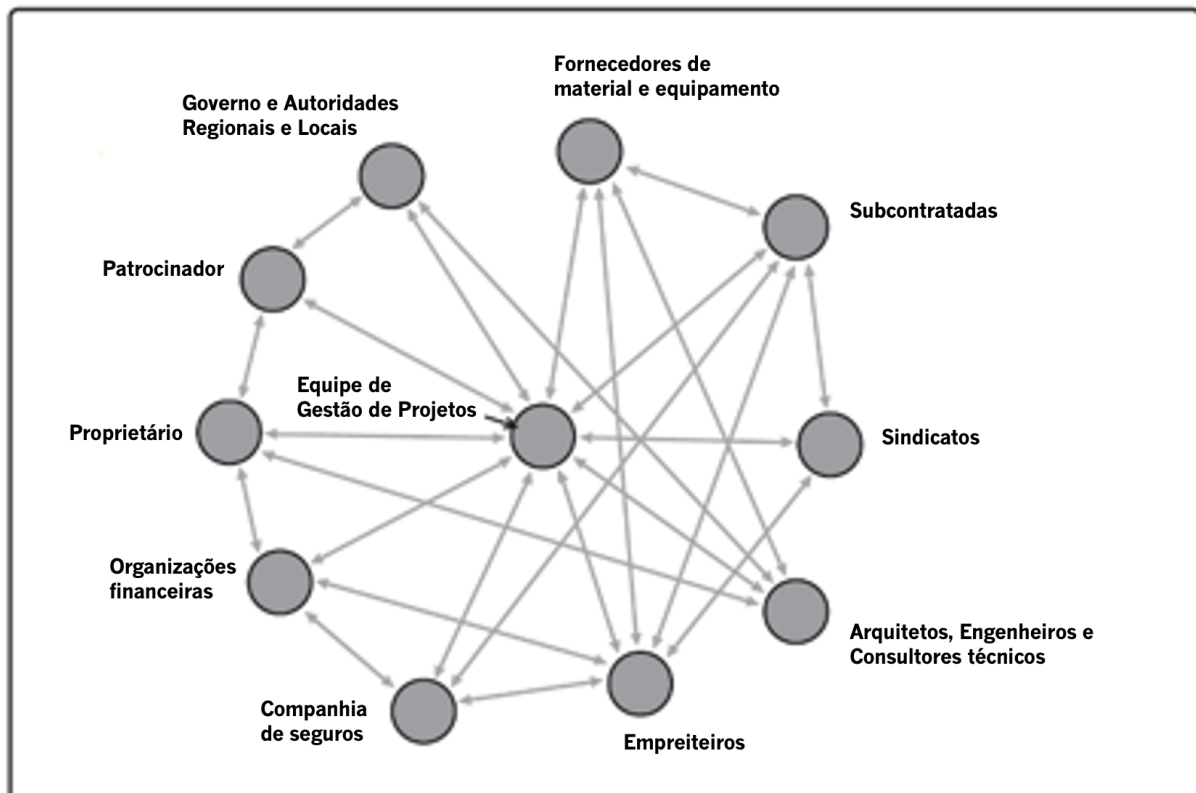


Figura 2 – Exemplo de rede de comunicação na construção
(Project Management Institute, 2016)

Outra questão é que os projetos de construção devem abordar simultaneamente a geografia, as condições do local, as comunidades, os ambientes físicos, a infraestrutura existente, bem como uma ampla gama de requisitos das partes interessadas. (Project Management Institute, 2016).

Importante destacar que outro desafio que a indústria da construção pode vir a enfrentar são as possíveis doenças individuais ou em grupo, como por exemplo o novo coronavírus (COVID-19), assunto que será tratado com maior detalhe no capítulo 3 do presente trabalho. Essa e outras doenças podem paralisar uma obra e colocar em risco a produtividade de uma indústria ainda pouco digitalizada.

Visto isto, a tabela seguinte demonstra de forma resumida todos os desafios e dificuldades levantados neste capítulo, os quais a indústria da construção enfrenta.

Tabela 1 – Dificuldades e desafios da indústria da construção

DIFICULDADES E DESAFIOS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO
1) Ambientes remotos e de difícil acesso
2) Condições insalubres de trabalho
3) Técnicas e ferramentas rudimentares e perigosas
4) Mão de obra com baixa qualificação e escassa
5) Equipamentos de proteção individual e coletivo negligenciados
6) Dificuldade em adotar novos métodos de produção
7) Baixo índice de digitalização
8) Projetos mais complexos e competitivos
9) Pouca partilha de conhecimento entre empresas do mesmo setor
10) Desperdício de materiais em obra (resíduos)
11) Alto consumo de energia e matéria-prima (poluentes)
12) Escassez de recursos
13) Baixa produtividade
14) Alta frequência de atrasos na entrega da obra
15) Dificuldade em orçamento (excede orçamento)
16) Retornos financeiros baixos e voláteis
17) Projetos resultam em produtos únicos
18) Regulamentações, leis e normas
19) Comunicação complexa
20) Informações não integradas
21) Logística complexa
22) Caracterização do espaço de obra
23) Intempéries, doenças (Covid-19)

Fonte: desenvolvido pelo autor

A presente seção abordou sobre os diversos desafios e problemas que a indústria da construção enfrenta atualmente. A seguir são abordadas as oportunidades da indústria da construção.

2.5 Oportunidades na indústria da construção

Como visto anteriormente, a indústria da construção enfrenta uma série de problemas devido a disparidade de tecnologias digitais entre o setor da construção que envolve o projeto e o setor que executa este projeto, mas objetivamente, o ambiente de obra, o qual ainda está limitado a informações em papel, ocasionando assim uma desorganização de informação, problemas de comunicação e erros de operação.

Para além deste fato, o processo construtivo ainda é muito rudimentar, mesmo existindo uma série de oportunidades que serão vistas no presente capítulo.

Um novo perfil emergente de trabalho está surgindo no mundo com o advento da Quarta Revolução Industrial, tornando-se rapidamente uma realidade vivida para milhões de trabalhadores e empresas em todo o mundo (World Economic Forum, 2018). A digitalização traz novas ferramentas para organizar, agilizar e otimizar o processo construtivo. Novas máquinas e equipamentos mais eficientes estão sendo criados e precisam ser introduzidos no ambiente de execução de obras para diminuir esta desconexão digital entre o escritório e o canteiro de obras.

O problema de escassez de mão de obra qualificada para a indústria da construção, citada anteriormente, embora indique a necessidade de mais treinamento e retenção, também é uma oportunidade à automação para preencher a lacuna. Indústrias como manufatura, aeroespacial e até o setor de serviços obtiveram ganhos de produtividade por meio das tecnologias de automação, e agora essas tecnologias estão começando a se tornar mais disponíveis para construção (AUTODESK, 2019).

Segundo a World Economic Forum (2018), as lacunas de habilidades, tanto entre os trabalhadores quanto entre líderes, podem acelerar as tendências de automação em alguns casos, mas também dificultar significativamente a adoção de novas tecnologias e, portanto, impedir o crescimento dos negócios.

No momento em que se introduz a digitalização no ambiente da construção, com computadores e máquinas autônomas, melhora a conexão entre o setor de planejamento e engenharia com o setor de execução do projeto, independente da distância geográfica.

As oportunidades inerentes à prosperidade econômica e ao progresso da sociedade para esse novo mundo do trabalho são enormes, porém dependem crucialmente da capacidade de todas as partes interessadas em instigar reformas nos sistemas de educação e treinamento, políticas do mercado de trabalho, abordagens comerciais para o desenvolvimento de habilidades, acordos de emprego e contratos sociais existentes. Essas mudanças exigirão uma liderança ousada e um espírito empreendedor de empresas e governos, além de uma mentalidade ágil de aprendizado ao longo da vida dos colaboradores (World Economic Forum, 2018).

Como tem sido o caso ao longo da história econômica, espera-se que esse aumento de empregos existentes, por meio da tecnologia, crie tarefas totalmente novas, desde o desenvolvimento de aplicativos até a pilotagem de *drones*, por exemplo, para monitorar remotamente um ambiente de trabalho (World Economic Forum, 2018).

Ao mesmo tempo, no entanto, também está claro que esta tendência de avanços tecnológicos da Quarta Revolução Industrial está definida para reduzir o número de trabalhadores necessários para determinadas tarefas de trabalho (World Economic Forum, 2018).

A adoção de novas tecnologias impulsiona o crescimento dos negócios, a criação de novos empregos e o aumento dos empregos existentes, desde que elas possa alavancar totalmente os talentos de uma força de trabalho ágil e motivada, equipada com habilidades à prova de futuro para tirar proveito de novas oportunidades por meio de reciclagem e aprimoramento contínuos (World Economic Forum, 2018).

O Instituto McKinsey Global estima que o mundo precisará gastar US \$ 57 trilhões em infraestrutura até 2030 para acompanhar o crescimento do PIB global. Este é um grande incentivo para a indústria da construção identificar soluções para transformar a produtividade e entrega de projetos por meio de novas tecnologias e melhores práticas (McKinsey&Company, 2016).

O Instituto McKinsey&Company (2016) apresenta cinco maneiras pelas quais a indústria da construção pode se transformar nos próximos anos, dentre elas:

(1) Levantamento e geolocalização de alta definição: as surpresas geológicas são um dos principais motivos pelos quais os projetos estão atrasados e ultrapassam o orçamento.

(2) BIM (Modelagem de Informações da Construção) - 5D: plataforma integrada de planejamento de projeto que permite efetuar orçamentos mais assertivos, em tempo real com o design (BIM 3D) e o cronograma (BIM 4D) do projeto, eliminando as ferramentas de software personalizados e não integrados (que não sincronizam informações).

(3) Colaboração digital e mobilidade: mudança para projetos sem utilização de papel - desde o escritório até a ambiente de obra - com a digitalização dos processos para possibilitar compartilhamento de informações online e em tempo real e assim, garantir a transparência e colaboração, além de resultados mais confiáveis.

(4) Internet das Coisas (IoT) e análises avançadas: sensores, dispositivos de comunicação e outras tecnologias sem fio podem ajudar a monitorar a produtividade e a confiabilidade da equipe e dos ativos; permitem que equipamentos e ativos se tornem “inteligentes” ao conectá-los uns aos outros. Em um canteiro de obras, a IoT permite que máquinas de construção, equipamentos, materiais e estruturas se comuniquem por meio de uma plataforma de dados.

(5) Projeto e construção preparados para o futuro: novos materiais de construção, bem como abordagens de construção inovadoras, como por exemplo a impressão 3D e os módulos pré-fabricados, podem reduzir custos e acelerar a construção, melhorando a qualidade e a segurança.

Todos os cinco itens descritos acima são de suma importância para o funcionamento da tecnologia de impressora 3D, principalmente a programação por plataforma BIM em que, segundo o Project Management Institute (2016), “é um sistema de processo baseado em informações envolvendo a geração e gestão de representações digitais de características físicas e funcionais de projetos de construção, criando valor de longo prazo e aumentando a possibilidade de inovação”.

O BIM melhora a forma como os projetos são criados e construídos, possibilita a distribuição de informações a todas as áreas envolvidas no projeto, beneficiando diversas áreas da construção. Também fornece os meios para construir protótipos virtuais completos antes mesmo que a construção real ocorra (Project Management Institute, 2016). Com isso, possibilita a visualização da obra e o ajuste de qualquer erro ou falha do projeto. A impressora 3D depende de programa de software para seguir comandos, oriundos de plataforma BIM.

Outro item citado como abordagem inovadora de construção são os módulos pré-fabricados, os quais estão se tornando mais prevalentes nas construções atuais, resultando em uma melhor eficiência do processo construtivo, reduzindo custos, tempo, além de substituir a mão de obra cara no local da obra para uma construção em ambiente mais controlado, garantindo segurança e qualidade (Project Management Institute, 2016). A tecnologia de impressora 3D possibilita a fabricação de tais peças pré-moldadas, como exemplo da impressora D-Shape, abordada posteriormente.

Enquanto a indústria da construção enfrenta diversos desafios vistos anteriormente, também apresenta um número maior de oportunidades para automação. As tecnologias de robótica estão sendo desenvolvidas e distribuídas mais amplamente em um ritmo cada vez maior, criando um ciclo de feedback positivo que leva a custos mais baixos, mais pesquisas e mais desenvolvimento. Em 2018, a indústria da construção está em um período de adoção de tecnologias, com as tecnologias gerais de robótica sendo traduzidas em casos de uso específicos, resolvendo problemas na construção (AUTODESK, 2019).

É nesse contexto que, em junho de 2018, a Autodesk e a MassRobotics realizaram a Cúpula de Robótica em Construção no “Autodesk BUILD Space” - Building, Inovação, Aprendizado e Design, em Boston, nos Estados Unidos da América do Norte. O evento foi realizado para reunir a comunidade de robótica e a

comunidade de construção na região de Boston e incentivar uma discussão entre essas duas comunidades (AUTODESK, 2019).

Enquanto as empresas da indústria de construção precisam de soluções para problemas específicos, as empresas de robótica precisam encontrar casos de uso específico para a aplicação de tecnologias de robôs que desenvolvem. Trabalhar em conjunto oferece vantagens para todos os envolvidos (AUTODESK, 2019).

O “Autodesk BUILD Space” é um workshop colaborativo de pesquisa e desenvolvimento baseado em uma instalação de 34.000 pés quadrados no sul de Boston. Por meio de um grande investimento em infraestrutura e ferramentas disponibilizadas para empresas, *startups* e organizações de todos os tipos, o BUILD Space procura incentivar essa confluência de oportunidades para criar o futuro da construção (AUTODESK, 2019).

O MassRobotics é um centro de inovação e concentração de empresas *startups* sem fins lucrativos, com sede em Boston, focado nas necessidades da comunidade de robótica, o maior centro de robótica nos Estados Unidos da América do Norte. A missão da MassRobotics é ajudar a criar e escalar a próxima geração de empresas bem-sucedidas de robótica e dispositivos conectados, fornecendo a empreendedores e *startups* inovadoras de robótica e de automação, um espaço de trabalho adequado com os recursos necessários para desenvolver, prototipar, testar e comercializar seus produtos e soluções (AUTODESK, 2019).

O Autodesk Robotics Lab, anteriormente conhecido como Applied Research Lab, é uma pequena equipe sediada no centro de tecnologia Pier 9 da Autodesk, em São Francisco, que constrói protótipos do mundo real através de uma variedade de tecnologias e assuntos, a fim de ajudar a entender o futuro da tecnologia de ponta. Um de seus principais objetivos é explorar novas maneiras de interagir com robôs (AUTODESK, 2019).

O trabalho que está sendo feito hoje para unir os mundos da robótica e da construção é emocionante, fascinante e encorajador, mas ainda há muito mais a ser feito. Embora a automação na construção tenha uma história longa e rica, ainda estamos apenas no início de uma nova era, que verá fluxos de trabalho tradicionais de longa data na construção transformados com a ajuda da robótica e da automação (AUTODESK, 2019).

À medida que a população de nosso planeta cresce rapidamente e há demanda por novos edifícios, e à medida que enfrentamos desafios ambientais aqui na Terra e oportunidades de expansão para o espaço,

a construção enfrenta novos desafios sem precedentes e novas oportunidades ousadas (AUTODESK, 2019).

Em se tratando das diversas aplicações possíveis das impressoras 3D, a NASA fez parceria com o Exército dos Estados Unidos da América do Norte para ajudar a resolver o desafio, construindo, com esforços compartilhados, postos avançados de longo prazo em locais remotos, mas isso aqui na Terra (AUTODESK, 2019).

Mais notavelmente, a Swamp Works trabalhou com o Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América do Norte e o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos da América do Norte no projeto de Construção Automatizada de Estruturas Expedicionárias (ACES). O objetivo do projeto é desenvolver sistemas de construção automatizados para substituir os quartéis de cabanas usadas atualmente pelo Exército, produzidos em madeira compensada (AUTODESK, 2019).

As estruturas de concreto impressas em 3D levarão menos tempo para serem construídas, fornecerão melhor proteção, exigirão uma quantidade menor de pessoas envolvidas, produzirão menos desperdício de materiais e seguirão os estilos padrões arquitetônicos de construção regionais, para que, desta forma, possam ser deixados para as populações locais habitarem, quando cessar a missão do Exército (AUTODESK, 2019).

Trabalhando no Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Construção (CERL), em Champaign, Illinois, a equipe da ACES usou uma impressora 3D de pórtico robótico para imprimir um quartel de 50 metros quadrados. A Caterpillar também fez parceria com o projeto e ajudará a explorar as oportunidades de comercialização da tecnologia (AUTODESK, 2019). A Caterpillar é uma empresa multinacional, de origem estadunidense, que fabrica máquinas, motores e veículos pesados, voltados principalmente para a construção civil e mineração.

Diversos estudos estão sendo realizados para implementar a robótica e a automação em vários níveis da construção e seu processo construtivo, para diversos propósitos e interesses. Importante destacar outra grande oportunidade trazida com a robotização e automação, que são as possibilidades de executar uma atividade distante geograficamente do escritório da empresa, permitindo-o de realizar a partir de qualquer lugar e condição.

Isto quer dizer que independe da falta presencial física de colaboradores, por diversos motivos, como por exemplo, as dificuldades de acesso em obras, riscos de saúde e segurança, distância, outras intemperes ou até mesmo devido a doenças, como é o caso do novo coronavírus (COVID-19), que obrigou

os trabalhadores a trabalharem de forma remota, quando possível. Este assunto em específico será abordado em maior detalhe no próximo capítulo.

3. O NOVO CORONA VÍRUS E SUAS CONSEQUÊNCIAS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

Em meados do ano de 2020, os países de todo o mundo sentiram os efeitos do novo Corona Vírus (COVID-19). Neste capítulo será abordado este assunto por possuir papel relevante para este trabalho, o que será explicado a seguir.

3.1 Conceito de Corona Vírus (Covid-19)

Segundo a OMS - Organização Mundial da Saúde (Direção-Geral da Saúde, 2020), os coronavírus pertencem à família *Coronaviridae* que podem causar infecção tanto no homem como em animais (por exemplo nos morcegos, camelos, civetas e nas aves). Normalmente, estas infecções afetam o sistema respiratório, podendo ser semelhantes às constipações comuns ou evoluir para uma doença mais grave, como a pneumonia. Dos coronavírus que infectam o Homem, o atual designado SARS-CoV-2 (Síndrome Respiratória Aguda Grave - Coronavírus - 2) vêm causando graves consequências em todo o mundo.

O novo coronavírus, que origina a doença designada COVID-19 (*Coronavirus Disease*), foi identificado pela primeira vez em dezembro de 2019 na China, na cidade de Wuhan. Este novo agente nunca tinha sido identificado anteriormente em seres humanos e sua fonte de infecção é a transmissão de pessoa a pessoa, que pode acontecer por contato próximo com pessoas infectadas pelo SARS-CoV-2 (transmissão direta) ou através do contato com superfícies contaminadas (contaminação indireta) (Direção-Geral da Saúde, 2020).

Como resultado desta pandemia que se espalhou rapidamente, diversas medidas de prevenção têm sido estabelecidas em todo o mundo em função do alto potencial de contágio deste vírus, onde o principal recurso foi o de garantir o isolamento das pessoas dentro de suas casas.

3.2 Consequências do novo Corona Vírus na indústria da construção

Desde o aparecimento desta doença, diversas medidas estão sendo tomadas pelos governos, afetando gravemente a economia de todo o mundo. Isto porque, por períodos indeterminados os estabelecimentos, comércios e serviços tiveram que suspender suas atividades. Escolas foram fechadas e os trabalhadores foram impedidos de irem aos seus locais de trabalho, sendo obrigados a executar suas atividades de forma remota, quando possível. Os professores tiveram que adaptar-se a fim de garantir a continuidade dos ensinamentos para os estudantes, ministrando suas aulas através de videoconferência.

Assim como outras indústrias, a da construção também sofreu grande impacto. A Ordem dos Engenheiros de Portugal (OE) anunciou dia 01 de Abril de 2020 a elaboração de um documento com várias recomendações para a prevenção do contágio pelo novo coronavírus nos estaleiros de obra. A OE estabelece que a indústria da construção mantenha ativa suas atividades e, para isso, “é crítica a implementação de medidas para a prevenção do contágio da infecção, estendida e compreendida por toda a cadeia de subcontratação e por todos aqueles que diariamente desenvolvem atividade nos estaleiros. O exercício da atividade da construção tem de continuar a garantir a segurança dos trabalhadores, das empresas e da sociedade em geral” (ENGENHEIROS, 2020).

A OE ainda faz algumas recomendações excepcionais e temporárias, dirigidas a todos os envolvidos no ato de construir, para prevenir/mitigar a possibilidade de infecção/contágio por SARS-CoV-2 (COVID-19), considerando as particularidades dos estaleiros de construção de obras. Algumas medidas de prevenção ponderadas estão: cumprir as regras de etiqueta respiratória, lavar as mãos frequentemente, evitar o contato próximo com as pessoas, evitar encostar as mãos no rosto e não partilhar objetos pessoais ou comida. Outras recomendações da OE relacionam-se com as condições de admissão de trabalhadores no estaleiro, nos cuidados a se ter nos transportes de trabalhadores e materiais aos estaleiros, cuidados nos locais de refeições, nos escritórios, nas instalações sanitárias e nos vestiários, dentre outras (ENGENHEIROS, 2020).

No Brasil, o Sinduscon (Sindicato da Indústria da Construção) instituiu, com parceria de outras entidades profissionais, um comitê para acompanhar, analisar e estudar medidas que inibam ou reduzam a propagação do novo coronavírus (Covid-19) nos canteiros de obras e escritórios das empresas filiadas. A criação do comitê teve como objetivo avaliar diariamente o cenário e tomar as decisões mais adequadas ao momento (SINDUSCON-RS, 2020).

Foi disponibilizada uma cartilha orientativa onde descreve explicações à respeito desta doença e quais seus sintomas mais comuns, além de descrever medidas para evitar o contágio - como lavar as mãos com frequência utilizando sabão e álcool gel, evitar aglomerações, manter ambientes bem arejados, evitar compartilhar objetos de uso pessoal, usar máscaras, entre outras medidas. Também descreve ações para serem adotadas nos canteiros de obras e escritórios - como higienizar os ambientes, disponibilizar álcool gel, utilizar termômetros na portaria, evitar viagens, adotar regime *homeoffice* (trabalho a partir de casa) para o pessoal administrativo, fazer reuniões por meio de ligações ou videoconferências, evitar compartilhar documentos e outros materiais, pendurar cartazes com orientações e alertas, evitar aglomerações, dentre diversas outras ações (SINDUSCON-RS, 2020).

Assim como Portugal e Brasil, outros países estão restringindo atividades e orientando a população em relação à pandemia. A produção industrial em geral nos Estados Unidos da América do Norte viu os declínios mais acentuados desde muitas décadas, refletindo preocupações com interrupções na cadeia de suprimentos e vivendo os temores do mercado financeiro de uma recessão.

Alguns países tiveram as atividades da construção suspensas e os que não suspenderam, pelo menos reduziram a quantidade de trabalhadores nos canteiros de obra para garantir o distanciamento social mínimo. Porém, o que se observou foi uma preocupação em relação aos suprimentos, pois muitos fornecedores tiveram suas atividades suspensas ou dificuldades em transportar suas mercadorias, paralisando a produção.

As empresas de construção estão acostumadas a desacelerações cíclicas, mas a velocidade e a força com que o COVID-19 atacou não tem precedentes. Projetos estão sendo atrasados ou cancelados, as cadeias de suprimentos estão sob ameaça, a saúde do trabalho de funcionários e subcontratados é uma preocupação e o distanciamento social torna ainda maior o desafio nos canteiros de obras. Muitas empresas tiveram que dispensar trabalhadores e operam sem reservas substanciais de capital, impactando negativamente principalmente as pequenas e médias empresas (pwc, 2020).

A chegada da pandemia do novo coronavírus foi um alerta às empresas para a necessidade de se movimentar mais rápido do que nunca e pensar no futuro. Novas tecnologias são necessárias - destacando as tecnologias da Indústria 4.0. - para a sobrevivência em um mercado que exigirá sistemas de produção e cadeias de abastecimento mais ágeis e flexíveis (World Economic Forum, 2020).

Com as tecnologias da Indústria 4.0., como por exemplo, a impressão 3D, internet das coisas (IoT), robótica avançada, inteligência artificial e *big data* (sistema que administra grande quantidade de dados) - os fabricantes verão os benefícios de aplicar a mentalidade do *digital-first* (digital primeiro) ao invés de um negócio físico. Além disso, a crescente necessidade de interações virtuais com o *homeoffice* destacou a importância dos serviços em nuvem e as futuras soluções 5G, imprescindíveis neste momento crítico (World Economic Forum, 2020).

A automação está ajudando a operar com menos pessoas, especialmente quando tecnologias como a IoT e as soluções de monitoramento de máquina são usadas como força de trabalho remoto para controlar a produção mesmo estando em casa (World Economic Forum, 2020).

São exemplos de resiliência e adaptabilidade que levarão provavelmente a uma aceleração da adoção de tecnologias e processos de fabricação avançados para se ajustarem ao “novo normal”. Empresas

com visão de futuro, que investiram em tecnologias de fabricação avançadas, foram as mais resistentes à crise, sendo recompensadas por isso (World Economic Forum, 2020).

Ao mesmo tempo está sendo uma grande oportunidade para todas as empresas reavaliarem suas lacunas tecnológicas e colocarem em prática um plano de transformação digital para sair da crise mais fortes e mais preparadas para enfrentar interrupções futuras (World Economic Forum, 2020).

Atualmente estamos tratando sobre o novo coronavírus (COVID-19), no futuro pode haver paralisações na produção por outras razões, como por exemplo: novas doenças contagiosas, falta de trabalhador devido a greves gerais, obras de difícil acesso e insalubre, guerras, catástrofes naturais e etc. Motivos estes que levam a automação, a robótica e as impressoras 3D, assuntos deste trabalho, ganharem ainda maior relevância.

4. TECNOLOGIAS AM

Foi visto até o momento sobre os conceitos principais deste trabalho, um breve histórico sobre o tema e a situação atual da indústria da construção, desde desafios e dificuldades até oportunidades encontradas. Também foi comentado sobre a situação atual que as empresas vêm enfrentando após o surto do novo coronavírus, que paralisou o mundo e mostrou a importância de as empresas estarem preparadas às mudanças e investirem em tecnologias.

No presente capítulo espera-se abordar de forma mais detalhada sobre a tecnologia AM, quais as vantagens e desvantagens e quais as expectativas para o futuro de sua utilização.

4.1 Potenciais e desvantagens da tecnologia AM

A indústria da construção enfrenta sérios problemas resultantes da baixa produtividade e da crescente escassez de mão de obra qualificada. A digitalização e a automação de todas as etapas relevantes, desde o design e o planejamento até o processo de construção de fato, parece ser a única solução viável para superar os desafios urgentes (Mechtcherine et al., 2019).

Os principais incentivos que impulsionam a indústria da construção para a automação são a redução de custo, tempo, consumo de energia, uma liberdade de design sem precedentes (Lim et al., 2012) além de uma redução considerável de matéria-prima de até 30% e de emissão de CO₂ (Hamidi & Aslani, 2019).

Além disso, outras considerações que favorecem a indústria da construção automatizada são de promover a qualidade e a confiabilidade das estruturas, a melhoria das condições de trabalho, a padronização de componentes e a simplificação do processo de fabricação (Vähä et al., 2013).

Muitos desafios e limitações à inovação na construção civil, destacados anteriormente, são vistos como oportunidades para a AM (Delgado Camacho et al., 2018). Uma motivação proeminente para as tecnologias de construção AM é a segurança do trabalhador, particularmente em ambientes extremos (Delgado Camacho et al., 2018).

Uma solução usada para resolver os diversos problemas na construção foi a pré-fabricação de peças fora do local de execução do projeto, que depois são entregues e montadas no local, reduzindo a quantidade de mão de obra no ambiente de obra e, muitas vezes, aumentando a qualidade e consistência da construção (Delgado Camacho et al., 2018).

A AM poderia fornecer serviços para a indústria da construção, reduzindo a exposição dos trabalhadores em ambientes adversos e automatizando algumas das tarefas de construção (Delgado Camacho et al., 2018).

Outra oportunidade para a AM envolve o encolhimento da cadeia de suprimentos, principalmente para materiais que precisam ser entregues rapidamente. Isto porque a AM permite que peças personalizadas sejam impressas sob demanda a partir de um modelo 3D, que não exige tempo de entrega significativo. O uso de AM na construção poderia reduzir o número de etapas envolvidas na cadeia de suprimentos, aproximando o fornecedor do cliente. Ao invés de ter diversas empresas produzindo componentes diferentes, cada componente, depois de projetado, pode ser produzido diretamente usando AM. Isso diminuiria os problemas de produtividade causados por entregas tardias no local de trabalho (Delgado Camacho et al., 2018).

Em se tratando das dificuldades enfrentadas atualmente de encontrar mão-de-obra qualificada e experiente, especialmente em equipamentos específicos, a AM solucionaria este problema uma vez que seu uso diminui a demanda por trabalhos manuais especializados (Delgado Camacho et al., 2018).

Outro benefício potencial da AM é a redução da cofragem, e estruturas temporárias relacionadas, usadas durante a construção. A redução de seu uso, não apenas reduz o desperdício produzido durante a construção, mas também reduz em grande parte o custo e o tempo associados à colocação e desmontagem da cofragem (Delgado Camacho et al., 2018).

Uma abordagem alternativa é usar técnicas AM para fabricar as cofragens reutilizáveis. Um exemplo prático recente utilizou uma cera especializada para imprimir moldes em 3D para componentes de concreto pré-armado, que podem ser derretidos e reutilizados, resultando em muito menos desperdício, menos energia e menos consumo de material (Construction Equipment, n.d.).

As técnicas de AM também permitem que arquitetos e designers produzam geometrias complexas de interiores e exteriores que seriam difíceis (ou impossíveis) e caras de produzir usando processos substrativos e formativos. Esse benefício potencial oferece oportunidades para novos projetos e formas, dando mais liberdade aos arquitetos, sem afetar a complexidade e a produtividade durante a construção (Delgado Camacho et al., 2018).

A indústria da construção é frequentemente vista como um trabalho sujo e pouco atraente, que exige muito dos funcionários e o trabalho é lento com os métodos tradicionais de construção. Mas a indústria da construção está mudando rapidamente e evoluindo para um ambiente de alta tecnologia - com uma

impressora 3D, a tecnologia de produção moderna é integrada ao processo de construção. A impressão 3D em construção está em alta no várias partes do mundo (KAMP C, n.d.).

As impressoras 3D já são utilizadas em diversas áreas, como automotiva, aeronáutica e médica, e tem uma implementação lenta na área da construção civil principalmente devido às grandes escalas envolvidas e à complexidade da física e química dos materiais utilizados (SIKA, n.d.).

A colocação de concreto tradicional é o método de construção mais econômico e, como consequência, a impressão 3D tem potencial competitivo e eficiência ao utilizar o método tradicional de construção (SIKA, n.d.).

A transição dos processos construtivos para os processos digitalizados e automatizados envolve uma cadeia de conhecimentos técnicos, desde química de materiais, tecnologia de processo, até engenharia civil e arquitetura para facilitar uma implementação rápida e bem sucedida das impressoras 3D (SIKA, n.d.).

Os locais de construção estão mudando, visto que cada vez mais módulos estruturais estão sendo pré-fabricados sob condições industriais e automatizadas, e montadas no canteiro de obras, economizando tempo e custo para uma melhor qualidade (SIKA, n.d.).

A digitalização será o motor da inovação e da produtividade na indústria da construção, e graças às impressoras 3D os processos agora podem ser digitalizados do início ao fim, elevando padrões, velocidade e eficiência de todo o ciclo de vida da construção (SIKA, n.d.).

Visando compreender como funcionam as impressoras 3D na práticas e seus processos de fabricação, o próximo assunto aborda os processos AM.

4.2 Processos AM

Existem diferentes processos da AM que ajudam a entender como elas funcionam e quais as vantagens que a AM pode trazer para a construção. A ASTM (*American Society for Testing and Materials* - Sociedade Americana de Testes e Materiais) publicou uma norma internacional em colaboração com a ISO (*International Organization for Standardization* - Organização Internacional de Padronização), a qual estabelece e define termos usados na tecnologia de fabricação aditiva (AM) (ISO/ASTM, 2015). Neste documento a AM foi dividida em sete categorias de processos:

- Jateamento de ligantes (*Binder jetting*) - processo aditivo de fabricação no qual um agente de ligação líquida é depositado seletivamente para unir os materiais em pó.

- Deposição de energia direcionada (*Directed energy deposition*) - processo aditivo de fabricação no qual a energia térmica focalizada (fonte de energia, por exemplo laser, feixe de elétrons ou arco de plasma) é usada para fundir materiais derretendo à medida que são depositados.
- Extrusão de material (*Material extrusion*) - processo de fabricação aditivo no qual o material é dispensado seletivamente através de um bico ou orifício.
- Jateamento de materiais (*Material jetting*) - processo de fabricação aditivo no qual as gotas de material de construção são depositadas seletivamente. Exemplos de materiais incluem fotopolímero e cera.
- Fusão do leito de pó (*Powder bed fusion*) - processo aditivo de fabricação no qual a energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó.
- Laminação de folhas (*Sheet lamination*) - processo de fabricação aditivo no qual folhas de material são coladas para formar uma peça.
- Fotopolimerização em tanque (*Vat photopolymerization*) - processo de fabricação aditivo no qual o fotopolímero líquido em um tanque é curado seletivamente por polimerização ativada por luz.

4.3 Métodos de impressão 3D na construção

Segundo os autores Hamidi & Aslani (2019) atualmente o *Contour Crafting* (CC), *D-Shape* e *Concrete Printings* são considerados como sendo três pilares principais da impressão estrutural 3D em larga escala. Enquanto a CC é um processo montado em guindaste para aplicação no local da obra, os outros dois são processos externos baseados em pórtico (Hamidi & Aslani, 2019). Nas seções a seguir, os principais métodos de impressão 3D na construção serão abordados em detalhe, além de outros dois métodos mais recentes, o *Mesh Mould* e o *dfab*.

4.3.1 Contour Crafting (CC)

A CC foi introduzida por Khoshnevis em 2004, nos Estados Unidos da América do Norte. Considerada um sistema de construção viável, a CC é capaz de construir uma casa completa em um curto período de tempo. É uma tecnologia baseada em extrusão (*Material extrusion*), a qual expulsa uma pasta à base de cimento contra uma espátula, resultando em um acabamento de superfície lisa (Hamidi & Aslani, 2019). O desempenho da CC na construção é mostrado na Figura 3a, na qual o bico é transportado pelo sistema de pórtico instalado no local da obra. Camada por camada a tinta de concreto é depositada na sua posição especificada através do movimento do bico. As camadas inferiores endurecidas, depois de parcialmente curadas, são capazes de suportar a camada de cimento fresco (Hamidi & Aslani, 2019).

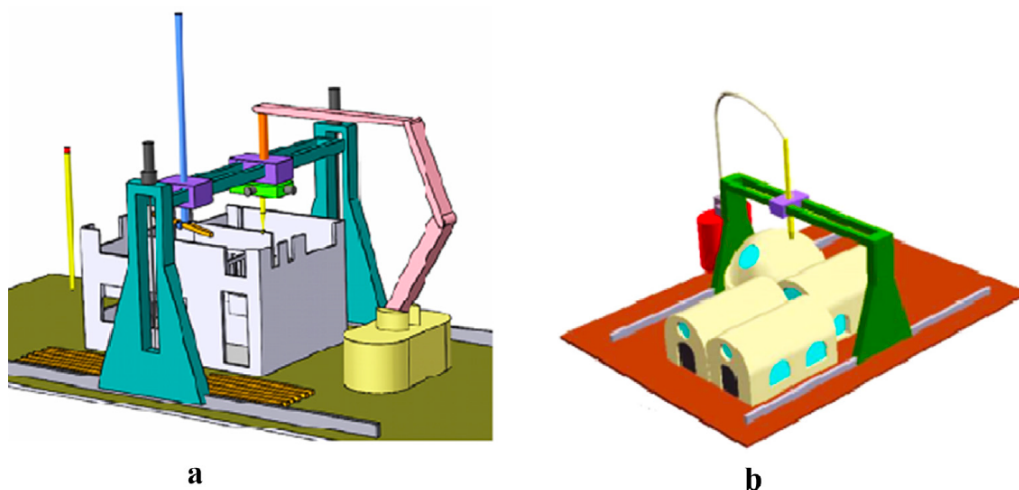


Figura 3 – (a) Construção convencional utilizando tecnologias CC, (b) Construção de casas adobe utilizando tecnologias CC
(Hamidi & Aslani, 2019)

O uso de duas espátulas é a característica superior da CC, que cria superfícies lisas e precisas sofisticadas, não havendo limitações de projeto para as estruturas criadas por CC. A técnica de construção camada por camada em CC propicia a capacidade de construir condutas dentro das paredes e permite mecanizar a instalação de canalizações e serviços elétricos. É possível fabricar estruturas de adobe (Figura 3b) sem componentes de suporte externo através da técnica CC, enquanto que as estruturas convencionais precisam de viga de suporte (Hamidi & Aslani, 2019).

Algumas vantagens da tecnologia CC são flexibilidade de design, possibilidade de utilizar diversos materiais e ser um processo de fabricação totalmente automatizado, onde somente a instalação de portas e janelas precisará de intervenção humana (Hamidi & Aslani, 2019). Devido às características superiores da CC, ela tem o potencial para ser usado na construção de casas não caras, abrigos de emergência e estruturas arquitetônicas complexas cuja fabricação por meio de abordagens convencionais é cara. Além de reduzir significativamente o custo da construção, ainda promete eliminar o desperdício de materiais de construção (Contour Crafting Corporation, n.d.).

4.3.2 D-Shape

A D-Shape é um método de construção digital que usa uma impressora 3D em leito de pó (*particle-bed*). Adotada na Itália por Enrico Dini (D-Shape, n.d.), sua primeira patente foi publicada em 2006 acompanhada por desenvolvimento subsequente (Hamidi & Aslani, 2019).

O processo D-Shape constrói o produto a partir de sucessivas camadas de seção transversal na impressão 3D em leito de pó. Basicamente o processo consiste em duas etapas de trabalho repetitivas: aplicação de uma camada de partículas secas e deposição seletiva de aglutinante por meio de uma cabeça de impressão ou bico, a fim de unir as partículas. Por fim, as partículas não ligadas são removidas em um processo de remoção do pó. O tratamento térmico ou a infiltração podem ser conduzidos quando o processo de impressão termina, a fim de melhorar a resistência e a durabilidade do componente impresso (Lowke et al., 2018).

A tecnologia D-shape foi originalmente concebida para construir estruturas de tamanho médio em um processo único. O procedimento de construção consiste basicamente na modelagem do projeto estrutural em um software CAD 3D e impressão da estrutura (Cesaretti et al., 2014).

A figura a seguir ilustra o mecanismo do processo D-Shape, onde a Figura 4a ilustra uma camada de material granular depositado e a Figura 4b mostra uma seção transversal do modelo impresso.

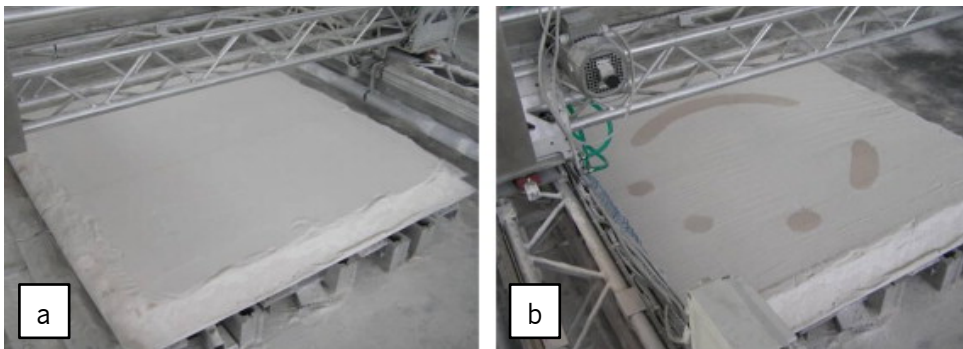


Figura 4 – (a) camada de material granular depositado, (b) seção transversal do modelo impresso.

(Cesaretti et al., 2014)

Três estratégias principais podem ser aplicadas para a produção de componentes de concreto por meio desta tecnologia: (1) impressão direta do componente usando um material cimentício, (2) impressão de uma cofragem preenchida com concreto fresco convencional, após o qual a cofragem é removida ou (3) impressão de uma cofragem permanente que forma um compósito com o concreto derramado. A cofragem pode ser fabricada usando materiais à base de cimento ou outros compósitos como areia e polímero. A Figura 5 apresenta um resumo das técnicas de impressão 3D em leito de pó.

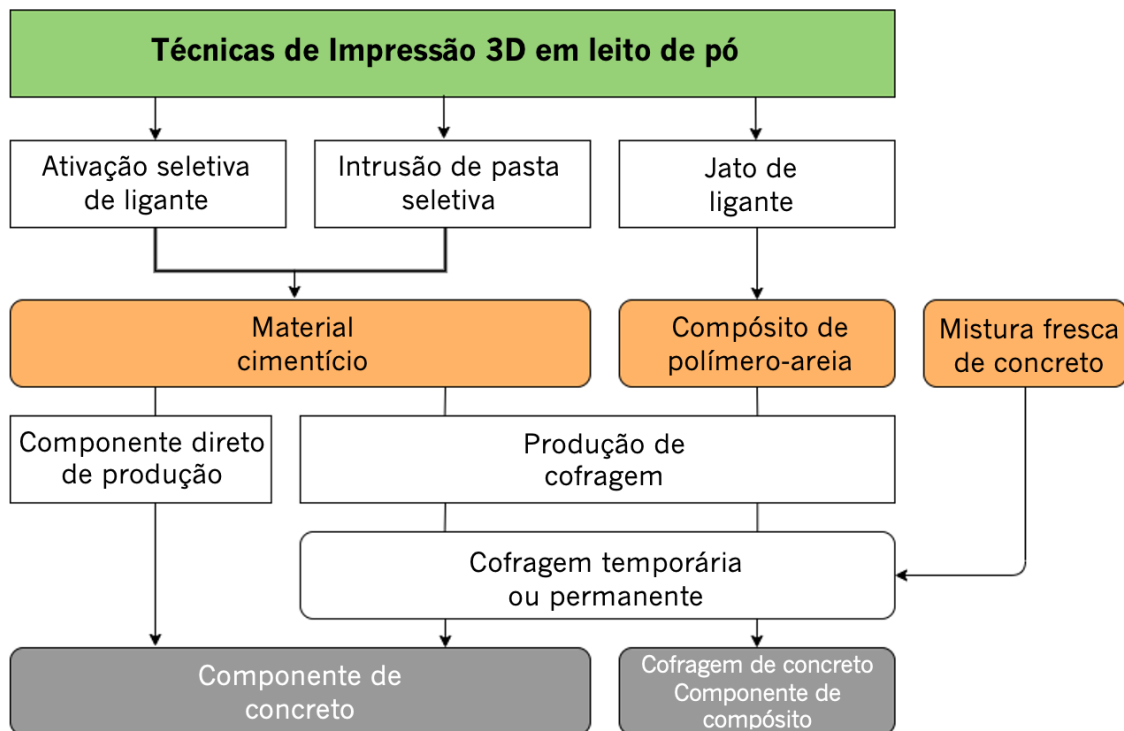


Figura 5 – Classificação de técnicas de impressão 3D em leito de pó na construção de concreto.

(Lowke et al., 2018)

Dependendo dos materiais utilizados para o processo de impressão, três técnicas diferentes de impressão 3D em leito de pó podem ser consideradas (Lowke et al., 2018):

- Ativação seletiva de aglutinante: Esta técnica consiste em uma mistura seca de agregado muito fino (normalmente areia <math><1\text{mm}</math>) e aglutinante - utilizado o cimento normalmente. O cimento seria seletivamente ativado por água ou uma solução de mistura de água.
- Intrusão seletiva de pasta: Consiste em partículas agregadas sem aglutinante. Por meio de bocais se aplica a pasta aglutinante (de cimento, água e misturas) ao leito de pó. Para fornecer resistência suficiente, a pasta de cimento deve preencher os vazios entre as partículas.
- Jateamento de ligantes: Consiste em aplicar o aglutinante líquido, geralmente uma resina, ao leito de pó. No processo de impressão das formas, o aglutinante reage com o componente endurecedor implementado no leito de pó.

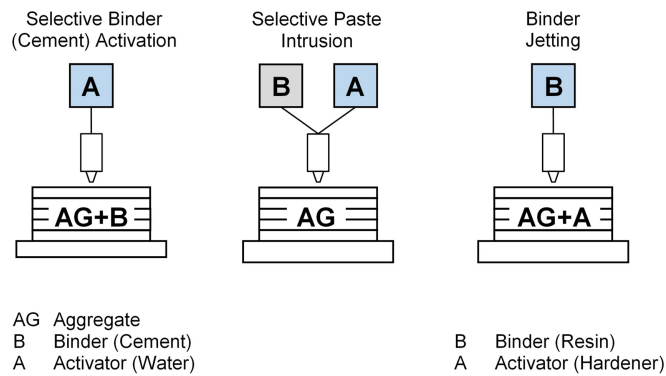


Figura 6 – Figura esquemática das técnicas de impressão 3D em leito de partículas em construção.

(Lowke et al., 2018)

Dentre as vantagens das técnicas de impressão 3D em leito de pó aplicadas à indústria da construção, destaca-se que elas não impõem quase nenhuma limitação ao design de estruturas em comparação com outras abordagens, apresentam alta resolução de produção mesmo para objetos de grande escala e ainda o tempo de produção é independente da complexidade geométrica. A grande desvantagem, ainda existente, de tais técnicas é o tamanho limitado do componente em função do espaço de impressão (Lowke et al., 2018).

4.3.3 Concrete Printing

O método de impressão em concreto (*Concrete Printing*) teve como trabalho pioneiro realizado pela Universidade de Loughborough (UK). Similar ao Contour Crafting, a *Concrete Printing* é um método baseado em extrusão para fabricar componentes cimentícios em um processo camada por camada, seguindo um modelo digital (Hamidi & Aslani, 2019).

Este tipo de impressão não usa espátula, portanto sua resolução de impressão é menor que da Contour Crafting. Além disso, o acabamento e o pós-processamento da impressão em concreto diferem da CC devido à produção de um acabamento com nervuras característico, como percebe-se na Figura 7a. Portanto, no caso de ser necessário o acabamento liso, existem duas formas para isso: a pasta úmida pode ser espatulada durante a impressão ou o acabamento impresso pode ser polido manualmente para resultar numa superfície lisa (Hamidi & Aslani, 2019).

A configuração inclui uma impressora Gantry conforme mostrado na Figura 7b. Este método de impressão cria pontos mecânicos fracos, com propriedades anisotrópicas devido à formação de vazios, debilitando o desempenho final do componente impresso (Hamidi & Aslani, 2019).

Além disso também cria problemas visuais, como efeito de escada na superfície de impressão concluída. Recentemente, foram introduzidos métodos de impressão em camadas curvas para melhorar as propriedades estéticas e mecânicas de uma peça impressa (Tay et al., 2017).

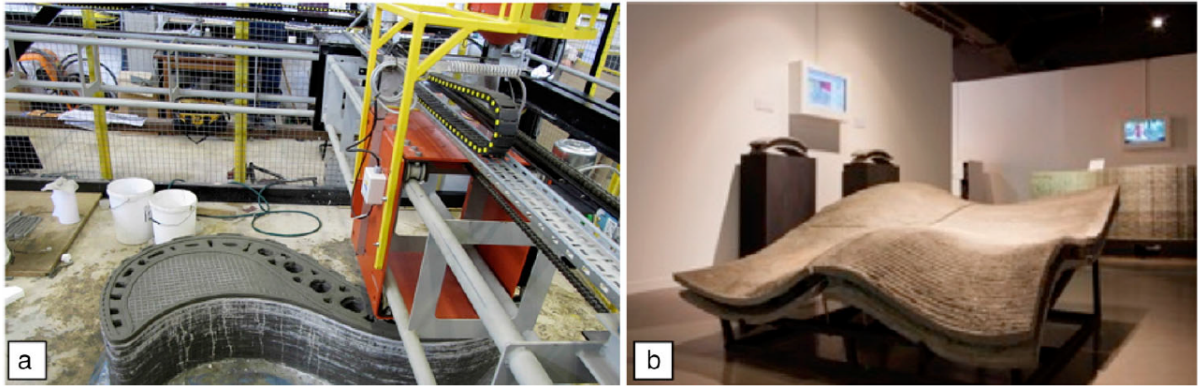


Figura 7 – (a) Impressora Concrete Printing, (b) Modelo impresso com Concrete Printing.

(Tay et al., 2017)

Analisados os três principais métodos de impressão estrutural 3D na construção, a figura abaixo resume as características similares e as diferenças entre eles.

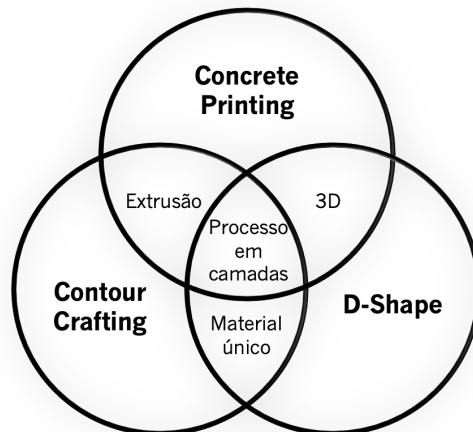


Figura 8 – Comparação entre CC, D-Shape e Concrete Printing.

(Lim et al., 2012)

4.3.4 Mesh Mould

Atualmente, existem vários segmentos de pesquisa e desenvolvimento que impulsionam o estado atual da robótica na construção, desde a indústria privada até o setor acadêmico e governamental. As duas abordagens principais podem ser caracterizadas como o desenvolvimento orientado à oportunidades e solução de problemas (AUTODESK, 2019).

O desenvolvimento orientado a oportunidades, como o trabalho realizado por pesquisadores acadêmicos da NCCR Digital Fabrication ou do laboratório Swamp Works da NASA, amplia os limites do que é possível, experimentando e projetando novas técnicas e tecnologias de construção (AUTODESK, 2019).

O desenvolvimento de solução de problemas, como o trabalho realizado pela Construction Robotics ou Bensonwood Homes, usa tecnologia robótica para resolver problemas atuais no ambiente de trabalho em aplicações de mercado (AUTODESK, 2019).

Ambas as abordagens são necessárias e, reunindo-as e encontrando aplicações de mercado benéficas e concretas para novas tecnologias experimentais, o vasto potencial subjacente da robótica na construção pode ser ainda mais realizado (AUTODESK, 2019).

Os Centros Nacionais de Competência em Pesquisa (NCCRs), são uma iniciativa de financiamento de pesquisa do governo suíço, conduzida pela Swiss National Science Foundation. Cada centro é hospedado e apoiado por uma instituição acadêmica suíça e concentra-se em uma área de pesquisa temática limitada, com uma rede de parceiros na esfera acadêmica e outros. Essas redes de pesquisa interdisciplinares se concentram em pesquisas de alto risco e alto retorno, de importância estratégica para o futuro da economia suíça (AUTODESK, 2019).

Russell Loveridge é o diretor administrativo da NCCR Digital Fabrication. Iniciada em 2014 e sediada na ETH Zurich, na Suíça, a NCCR Digital Fabrication é composta por 150 pesquisadores e 28 professores de diferentes áreas de especialização, incluindo arquitetura, projeto estrutural, ciência de materiais, ciência da computação, robótica e engenharia de sistemas de controle. A NCCR Digital Fabrication visa liderar o desenvolvimento e a integração de tecnologias digitais na arquitetura e nos futuros processos de construção (AUTODESK, 2019).

Com um mandato de 12 anos e financiamento para pesquisa, a NCCR Digital Fabrication possui uma estrutura para testar ideias e executar projetos de longo prazo que as empresas comerciais geralmente não podem pagar. Suas pesquisas se concentram em dois grandes desafios: a fabricação digital no local, trazendo novas tecnologias para os canteiros de obras e a pré-fabricação digital personalizada, usando o

ambiente seguro do laboratório para testar novas ideias para a robótica na construção (AUTODESK, 2019).

Os projetos de fabricação digital no local da NCCR Digital Fabrication visam trazer a fabricação digital para os canteiros de obras. Os pesquisadores investigam métodos integrados de projeto, planejamento e controle robótico, desenvolvem robôs versáteis de fabricação no local e examinam modelos de cooperação para interações homem-máquina e máquina-máquina (AUTODESK, 2019).

Alguns desafios que norteiam os estudos baseiam-se em descobrir como as tecnologias poderão ser utilizadas para proporcionar os recursos que hoje não existem no mercado, e como se poderá eliminar a cofragem na construção em concreto. Para resolver esse problema, eles primeiramente desenvolveram um fabricante no local, isto é, um sistema de robótica no local. Ao introduzirem robôs que podem se mover no canteiro de obras, a equipe enfrentou os desafios de localização e precisão (AUTODESK, 2019).

O resultado final deste experimento foi um projeto conhecido como *Mesh Mould*, um processo de fabricação robótica de malha, sem desperdícios para construções de concreto armado de formato não padrão, totalmente portadoras de carga. O *Mesh Mould* permite que paredes e colunas sejam feitas sem qualquer cofragem, usando um modelo digital gerado por computador em conjunto com robôs para fabricar uma malha de aço de alta precisão, densa o suficiente para reter o concreto fluido (AUTODESK, 2019).

O *Mesh Mould* é uma tecnologia de fabricação digital que integra a produção de reforço e cofragem em um único sistema de fabricação controlado por robôs. Um braço robótico móvel dobra, solda e corta reforço de aço para fabricar aditivamente uma malha projetada digitalmente, seja em ambiente *onsite* ou em um ambiente pré-fabricado. Esta malha é posteriormente preenchida com concreto e finalizada com uma camada de cobertura, que serve como elemento estrutural de concreto armado de formato livre (Norman Hack, Timothy Paul Wangler, Jaime Mata-Falcón, 2017).

Embora o *Mesh Mould* possa ser usado para construir paredes de concreto padrão, é especialmente benéfico para formas curvas e fora do padrão. O projeto *Mesh Mould* visa tornar a arquitetura de concreto armado não padronizada sustentável e economicamente viável, eliminando a necessidade de cofragens personalizadas caras (AUTODESK, 2019).

A ativação da malha como reforço a torna uma forma funcional que permanece no local, tornando o processo inerentemente livre de desperdícios. O próprio processo de fabricação robótica também reduz o desperdício, visto que geometrias complexas podem ser fabricadas sem custo adicional (Norman Hack, Timothy Paul Wangler, Jaime Mata-Falcón, 2017).

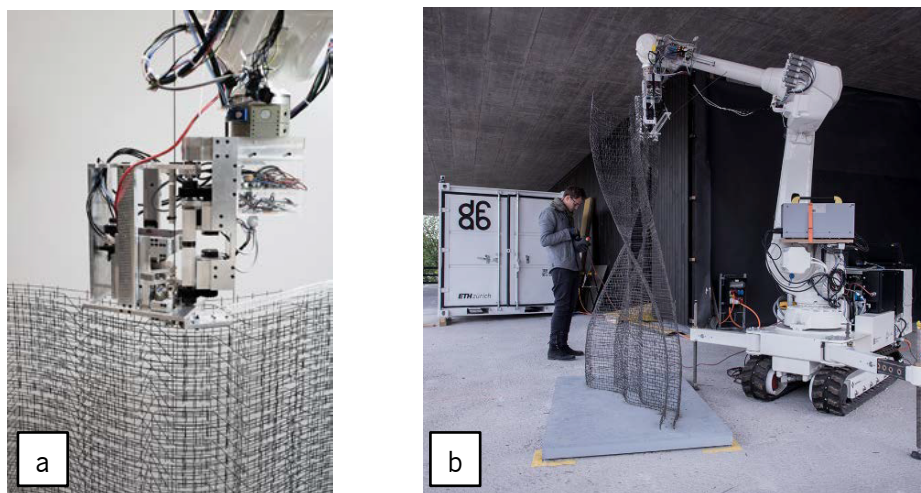


Figura 9 – (a) Cabeçote projetado para cortar, dobrar e soldar fios de aço, (b) Modelo impresso com Mesh Mould.

(Norman Hack, Timothy Paul Wangler, Jaime Mata-Falcón, 2017)

Em 2016, a *Mesh Mould* ganhou o Swiss Technology Award, a primeira premiação de uma tecnologia de construção. Desde que ganhou o prêmio, a equipe aumentou o Mesh Mould para poder construir no local e, assim construiu as primeiras paredes de Mesh Mould no canteiro de obras, em condições reais. Feito com vergalhão de 6 mm, o projeto usou concreto normal com alguns aditivos para aumentar sua viscosidade, permitindo que ele fosse aparado durante a fase plástica e criando um revestimento para o vergalhão.

4.3.5 Dfab

As técnicas de fabricação digital podem aumentar as taxas de produtividade na indústria da construção, não apenas porque levam a uma economia significativa de tempo para projetos complexos, mas também porque exibem a capacidade de transferir dados de projeto diretamente para operações de montagem 1: 1 e de construção automatizada (Keating & Oxman, 2013). No entanto, a fabricação digital aditiva (*dfab - additive digital fabrication*) aplicada à construção em larga escala ainda está no seu primórdio e precisa enfrentar desafios na mudança dos processos de construção convencionais e das funções dos participantes do projeto (García de Soto et al., 2018).

Tentativas iniciais foram feitas para aplicar *dfab* na prática real para avaliar seu potencial na indústria da construção. Por exemplo, a Gramazio Kohler Research da ETH Zurich realizou diferentes demonstradores

de construção elaborados com tecnologias robóticas. A fachada de tijolos do vinhedo de Gantenbein mostrou as possibilidades de projeto computacional e construção robótica para a pré-fabricação de estruturas complexas e multifuncionais de tijolos. Como o robô poderia ser acionado diretamente pelos dados do projeto, sem ter que produzir desenhos de implementação adicionais, os projetistas puderam trabalhar no projeto da fachada até o momento do início da produção (Fabio Gramazio, 2008).

Um projeto mais recente, “The Sequential Roof”, verificou com sucesso o potencial de processos *dfab* para a pré-fabricação de estruturas complexas de madeira em escala total de construção. Este telhado de 2300 metros quadrados, montado roboticamente, é formado por 120 treliças de madeira, cada uma produzida em 12 h. O desenvolvimento de projeto computacional robusto de estrutura de construção automatizada permitiu uma redução no tempo de construção em 10 vezes (Willmann et al., 2016).



*Figura 10 – Telhado projetado em dfab - “The Sequential Roof”
(Willmann et al., 2016)*

No entanto, poucos esforços de pesquisa foram feitos para investigar quantitativamente os benefícios que a fabricação digital aditiva pode oferecer à indústria da construção. O estado da arte inclui estudos quantitativos no campo da avaliação da sustentabilidade da fabricação digital, destacando benefícios como otimização de materiais ou integração funcional (García de Soto et al., 2018).

Por exemplo, Agustí-Juan & Habert (2017) avaliaram o potencial ambiental da fabricação digital aditiva, avaliando três estudos de caso e comparando-os com elementos de construção convencionais com a mesma funcionalidade. Este estudo também levantou a necessidade de encontrar as diferenças entre os processos convencionais de construção e os processos *dfab*, embora raramente isso seja pesquisado.

Ainda não está claro até que ponto a implementação de técnicas dfab melhorará o desempenho da construção em projetos reais. No entanto, para facilitar aplicações industriais em larga escala, é necessário realizar avaliações quantitativas que considerem o tempo de construção, o custo e a complexidade do projeto de novas técnicas (García de Soto et al., 2018).

4.4 Modelos de impressoras 3D na construção

4.4.1 Contour Crafting Corporation (CC Corp.)

As aplicações desta tecnologia podem incluir vários tipos de construções de edifícios, incluindo moradias, edifícios comerciais e governamentais, de vários andares a estruturas grandes com várias unidades (Figuras 11, 12 e 13). Outro domínio de aplicação é a construção de infraestrutura, que pode incluir fundações, lajes, pontes, postes, etc. - inclusive a construção extraterrestre, isto é, construir na Lua e em Marte para exploração, habitação e colonização planetária futura (Contour Crafting Corporation, n.d.).



Figura 11 – Moradias isoladas utilizando tecnologias CC
(Contour Crafting Corporation, n.d.)



Figura 12 – Edifícios de vários andares utilizando tecnologias CC
(Contour Crafting Corporation, n.d.)



Figura 13 – Estruturas grandes com várias unidades utilizando tecnologias CC
(Contour Crafting Corporation, n.d.)

As tecnologias revolucionárias da CC Corp. usam robótica moderna para construir casas personalizadas em poucas horas. Atualmente, segundo a empresa, essa tecnologia seria mais útil para moradias de baixa renda e reconstrução de emergência por agências de ajuda humanitária que trabalham em locais devastados por terremotos, inundações, guerras e outros desastres naturais (Contour Crafting Corporation, n.d.).

A tabela a seguir resume o impacto econômico da automação da construção pela Contour Crafting nos países desenvolvidos. Segundo a empresa, nos países em desenvolvimento, a proporção do custo da mão de obra é menor, enquanto a do custo material é maior. Independentemente disso, conforme

demonstrado pelo sucesso de outros equipamentos de construção avançados (como aqueles usados para construção de estradas), mesmo nos países menos desenvolvidos, os principais projetos de construção usam tecnologias de construção avançadas devido à maior produtividade, maior segurança e menor complexidade de logística de construção e gerenciamento de projetos que proporcionam as modernas tecnologias (Contour Crafting Corporation, n.d.).

Tabela 2 – Impacto econômico da automação da construção pela Contour Crafting

Parcela de custo de construção convencional	Devido a	Se automatizado por CC
20% - 25%	Financiamento	A curta duração do projeto e o controle do tempo de chegada ao mercado reduzirão drasticamente o custo de financiamento.
25% - 30%	Materiais	Não haverá desperdício na construção.
45% - 55%	Trabalho	O trabalho manual será significativamente reduzido. A força muscular será substituída pela força cerebral. Mulheres e trabalhadores idosos, pela primeira vez, encontrarão novas oportunidades de trabalho na construção.

Fonte: (Contour Crafting Corporation, n.d.)

4.4.2 D-shape®

A D-Shape® é uma máquina modular que pode ser fabricada em diversas dimensões, a qual materializa edifícios ou blocos de construção diretamente do seu computador por meio de um processo de alternar camadas de material granular até transformar o material granular em uma forma definida (D-Shape, n.d.).

A figura 14 ilustra o mecanismo de uma impressora D-Shape® e a Figura 15 mostra o produto final.



Figura 14 – Impressora 3D D-Shape.

(D-Shape, n.d.)



Figura 15 – Modelo impresso por D-Shape.

(D-Shape, n.d.)

A D-Shape® cobre um grande número de setores - ambiental, militar, arqueológico, marítimo, mobiliário e urbano, além do setor da construção com sistemas inovadores para edifícios, componentes de edifícios e também receitas e métodos relacionados para o desenvolvimento de materiais de construção reciclados (D-Shape, n.d.).

4.4.3 CONPrint3D®

Um novo conceito foi criado, correspondente a um processo de construção monolítico e sem cofragem, usando impressão 3D, no âmbito da iniciativa de pesquisa ZukunftBau (Futuro da Construção) do Instituto Federal Alemão de Pesquisa em Construção, Assuntos Urbanos e Desenvolvimento Espacial (BBSR). Eles denominaram de CONPrint3D®, que significa impressão 3D no local em grande escala (Mechtcherine et al., 2019).

O conceito CONPrint3D é baseado na deposição seletiva de material por extrusão, como as abordagens já existentes. As principais características do novo conceito que o distinguem de outras abordagens são (Mechtcherine et al., 2019):

- Adaptação da impressão 3D em concreto à arquitetura e design estrutural de hoje (cantos afiados, geometrias retas, grandes seções monolíticas);
- Uso máximo de máquinas de construção comuns, como bomba de concreto montada em caminhão;
- Composição e propriedades do concreto endurecido dentro dos padrões de concreto existentes;
- Cabeçote de impressão que permite qualidade da superfície e precisão / tolerâncias de acordo com os padrões existentes.

Ao introduzir o CONPrint3D, foram apresentadas várias perspectivas sobre o estado da arte e a nova abordagem, a saber: engenharia mecânica, tecnologia de concreto e gerenciamento de construção (Mechtcherine et al., 2019).

A figura abaixo ilustra uma abordagem da CONPrint3D que descreve uma bomba de concreto montada em caminhão como manipulador para impressão de concreto no local.

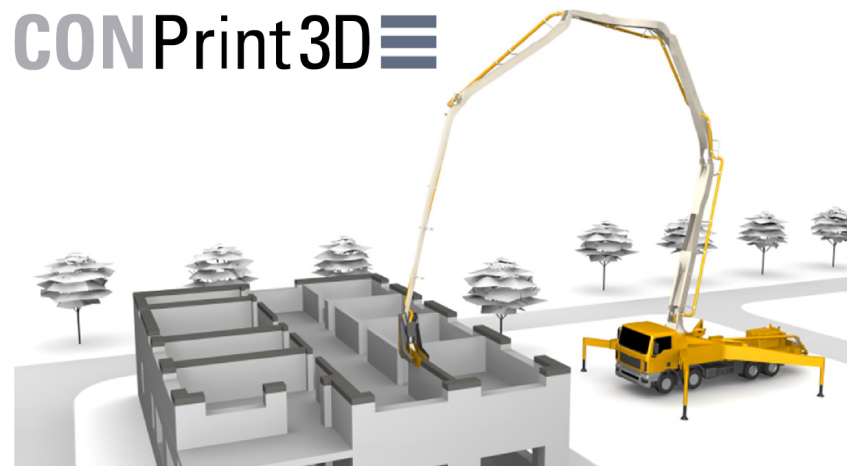


Figura 16 – Impressora CONPrint3D®.

(Mechtcherine et al., 2019)

4.4.4 COBOD

Uma parceria da PERI e COBOD desenvolveram uma impressora 3D, chamada BOD2. Segundo eles é a única impressora de construção 3D de segunda geração do mundo para uso em construção residencial ou produção pré-moldada, a qual pode produzir estruturas de concreto de maneira rápida e econômica, com um grau significativo de flexibilidade de projeto, sem necessidade de cofragem, além de uma grande liberdade de design - com possibilidade de paredes retas ou curvas. Isso torna o procedimento uma alternativa ideal pra a construção convencional em tijolos. Seu objetivo é construir um maior número de edifícios em um menor espaço de tempo, de forma segura, com um custo menor, fazendo desta tecnologia um sucesso comercial (PERI, n.d.).



Figura 17 – Impressora BOD2.

(PERI, n.d.)

Acreditam firmemente que a impressora 3D revolucionará a indústria da construção devido à sua capacidade de acelerar o processo da indústria de construção. Ao adicionar designs mais inteligentes e um uso otimizado de materiais à mistura, a impressão 3D de construção também pode abrir caminho para um ambiente construído com maior sustentabilidade”. Explicam ainda que ela pode economizar tempo e dinheiro, tornando os locais de trabalho mais atraentes e com confiabilidade de planejamento. O estágio final de planejamento acontece antes do início do projeto e fornece a todas as partes envolvidas a confiabilidade do planejamento desde o início, o que leva à redução de tempo e custo (PERI, n.d.).

A BOD2 é operada por apenas duas pessoas e é o processo mais rápido do mundo (1m/s - um metro por segundo). O processo de construção é automatizado e otimizado, o que reduz o grau de coordenação necessário. A impressora é uma máquina inovadora, limpa e segura, exigindo muito pouco de trabalho físico, melhorando as condições de trabalho e tornando mais fácil atrair funcionários qualificados. (PERI, n.d.).



Figura 18 – Processo de operação da Impressora BOD2.

(PERI, n.d.)

Por possuir estrutura modular, a BOD2 pode ser configurado de forma customizada e pode ser usado tanto em canteiros de obra quanto em fábricas, com facilidade tanto de manter como de movimentar. Cada impressora BOD2 é composta por um sistema de *gantry* com vários módulos de 2,5 metros e pode ser configurada em todas as 3 dimensões. Isso significa que as medidas podem ser configuradas individualmente para diferentes aplicativos e projetos, e a impressora também pode ser expandida de maneira direta. Além disso, o sistema *gantry* elimina a necessidade de realocação frequente e calibração recorrente da impressora, o que economiza muito tempo, já que cada processo de calibração tende a levar várias horas (PERI, n.d.).

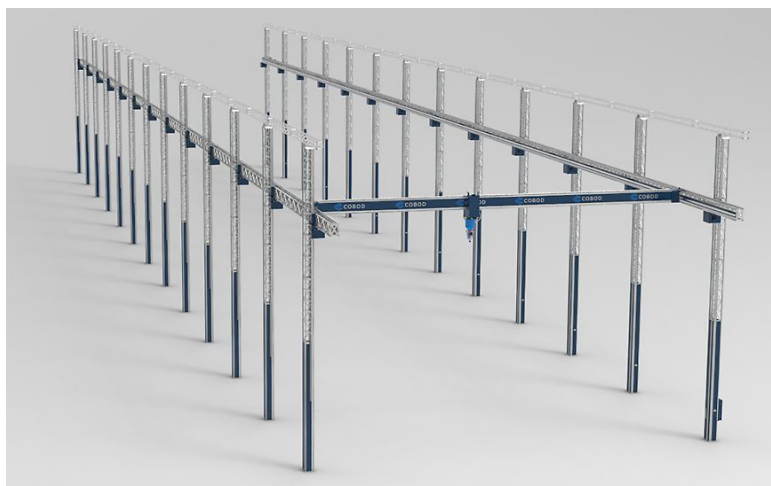


Figura 19 – Estrutura modular da Impressora BOD2.

(PERI, n.d.)

As dimensões máximas da BOD2 é de 15 metros de largura e 10 metros de altura, o comprimento não possui limitação, podendo ser quanto quiser. A maior BOD2 entregue pode imprimir edifícios com quase 1.000m² de área em 3 andares. A velocidade de impressão mais alta é de 1m/s (um metro por segundo), porém, por questões de segurança e para garantir que pode se incorporar operações manuais no processo de impressão, a velocidade ideal é de 25cm/s (vinte e cinco centímetros por segundo). Leva aproximadamente 5 minutos para completar 1m² de parede oca. O material utilizado pode ser qualquer argamassa ou concreto de origem local para a impressão em 3D. O controle é tangencial, o que torna possível imprimir em superfícies muito lisas, se necessário, ou superfícies rugosas como elemento estilístico ou para mesmo simplificar o procedimento de estuque (PERI, n.d.).

O edifício BOD foi a primeira construção residencial em impressora 3D desenvolvido com ideia de demonstrar como a tecnologia de impressão 3D pode ser aplicada à indústria de construção tradicional na Europa, atendendo aos rigorosos regulamentos de construção europeus. Explicam que BOD é uma abreviatura de “*Building on Demand*” - Construção por demanda. A construção do edifício BOD não possui uma única parede reta, inclusive para as fundações teve uma seção em 3D. Neste prédio foi criada uma fórmula adequada não apenas para impressão 3D, mas também para utilização de quantidade significativa de materiais reciclados (PERI, n.d.).



Figura 20 – Edifício BOD.

(PERI, n.d.)

Outro projeto mais recente e de maior porte criado pela impressora COBOD contou com oito parceiros, tanto empresas quanto instituições científicas (a citar: Beneens, ETIB / CONCRETE HOUSE, Groep Van Roey, Thomas More, Trias architecten, Ugent, Vicré e Saint-Gobain Weber), que se juntaram no projeto chamado C3PO - em homenagem ao famoso robô do filme Star Wars, com apoio do ERDF (*European Regional Development Fund*) e da Província de Antwerp na cidade Flanders (Bélgica) (Flanders, n.d.). Foi construída a primeira casa com a utilização da maior impressora 3D de concreto na Europa (Figuras 21 e 22).

A casa de demonstração possui 90m² e foi impressa em uma só peça em impressora, com 2 pisos e oito metros de altura. Sólida, a casa impressa é três vezes mais resistente do que uma casa construída com blocos de construção clássicos. Além de fibras contidas no concreto, apenas uma armadura de contração mínima foi utilizada e garante uma economia de cerca de 60% do material, tempo e dinheiro (KAMP C, n.d.).



Figura 21 – Projeto C2PO.
(Flanders, n.d.)



Figura 22 – Casa de demonstração do Projeto C2PO.
(INSIDER, 2020)

Segundo a (KAMP C, n.d.), a impressão 3D em construção está em ascensão em todo o mundo, com inúmeras opções implementadas, desde moradias temporárias a apartamentos completos. Destacam que, no entanto, enfrentam desafios improváveis na construção: o consumo de materiais e energia deve

diminuir, devem trabalhar na redução de CO₂, o fluxo de resíduos deve ser menor, há uma demanda crescente por casas de alta qualidade e acessíveis, e assim por diante. Acreditam que as novas tecnologias, como a impressão 3D de concreto, podem fornecer respostas para isso. Por esta razão criaram um local no terreno da Kamp C, onde as empresas da indústria da construção, em conjunto com instituições de pesquisa e ensino, podem experimentar totalmente a impressão 3D.

4.4.5 Apis Cor

A Apis Cor aplica o método de manufatura aditiva para construir casas de forma robotizada, com alta velocidade de construção, com custos relativamente baixos em comparação com as construções tradicionais, com minimização do trabalho manual e estabilidade de alta qualidade das casas construídas. Houve aplicações bem-sucedidas em larga escala, onde a impressão de uma casa em 3D levou apenas 24 horas. O projeto apresenta uma redução potencial de custos em até 40% em comparação com uma casa de concreto convencional (Apis cor, n.d.). A figura 23a apresenta a impressora Apis Cor e a figura 23b mostra um modelo sendo construído com a impressora 3D Apis Cor. A figura 24 mostra a comparação entre construção tradicional e esta utilizando a impressora Apis Cor.



Figura 23 – (a) Impressora Apis Cor, (b) Modelo sendo construído com a impressora 3D Apis Cor
(Apis cor, n.d.)

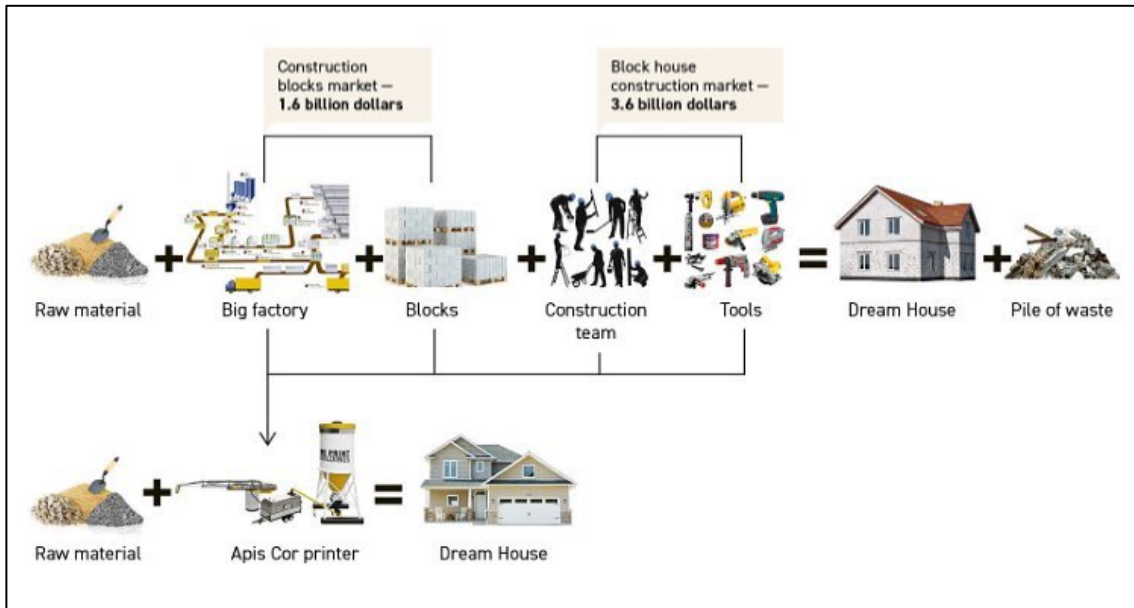


Figura 24 – Comparação do processo da construção tradicional com a impressão de construção 3D Apis Cor
(Apis cor, n.d.)

4.4.6 Sika®

Considerada líder na digitalização e industrialização da construção de concreto e a única empresa capaz de fornecer todas as tecnologias necessárias para a impressão industrial 3D de concreto de uma única fonte, a Sika é uma empresa de especialidades químicas, que oferece um equipamento com uma série de características: alta velocidade de impressão 3D com tecnologia mais precisa disponível no mercado; automação com controle de processo de pulsação e extrusão; tecnologia de fibra Sika para estabilidade; tecnologia de concreto e design de mistura desenvolvido por Sika® ViscoCrete®; três bombas dosadoras que permitem mudanças de cor; e sistema totalmente automatizado para acompanhar a resistência desde a mistura até o endurecimento (SIKA, n.d.).

O tamanho da impressora é de até 5 metros para construir grandes peças pré-fabricadas, que pode chegar a uma velocidade horizontal e vertical de até 1 metro por segundo (1m/s) e possui 7 patentes em processos de impressão, materiais inovadores e aditivos para impressão 3D.

A figura a seguir mostra uma peça sendo impressa, na qual é possível perceber a precisão da impressão.



*Figura 25 – Modelo sendo construído com a impressora 3D da Sika®
(SIKA, n.d.)*

A colocação de concreto tradicional é o método de construção mais econômico. Se a impressão 3D em concreto quiser competir com esse método, as estruturas precisam ser impressas de maneira eficiente e é exatamente para isso que a tecnologia da Sika foi projetada. “Com nossa tecnologia, agora é possível imprimir concreto de forma tão rápida, econômica e precisa que ele pode ser usado em canteiros de obras”.

5. OS AVANÇOS E PERSPECTIVAS DA IMPRESSORA 3D NO MUNDO

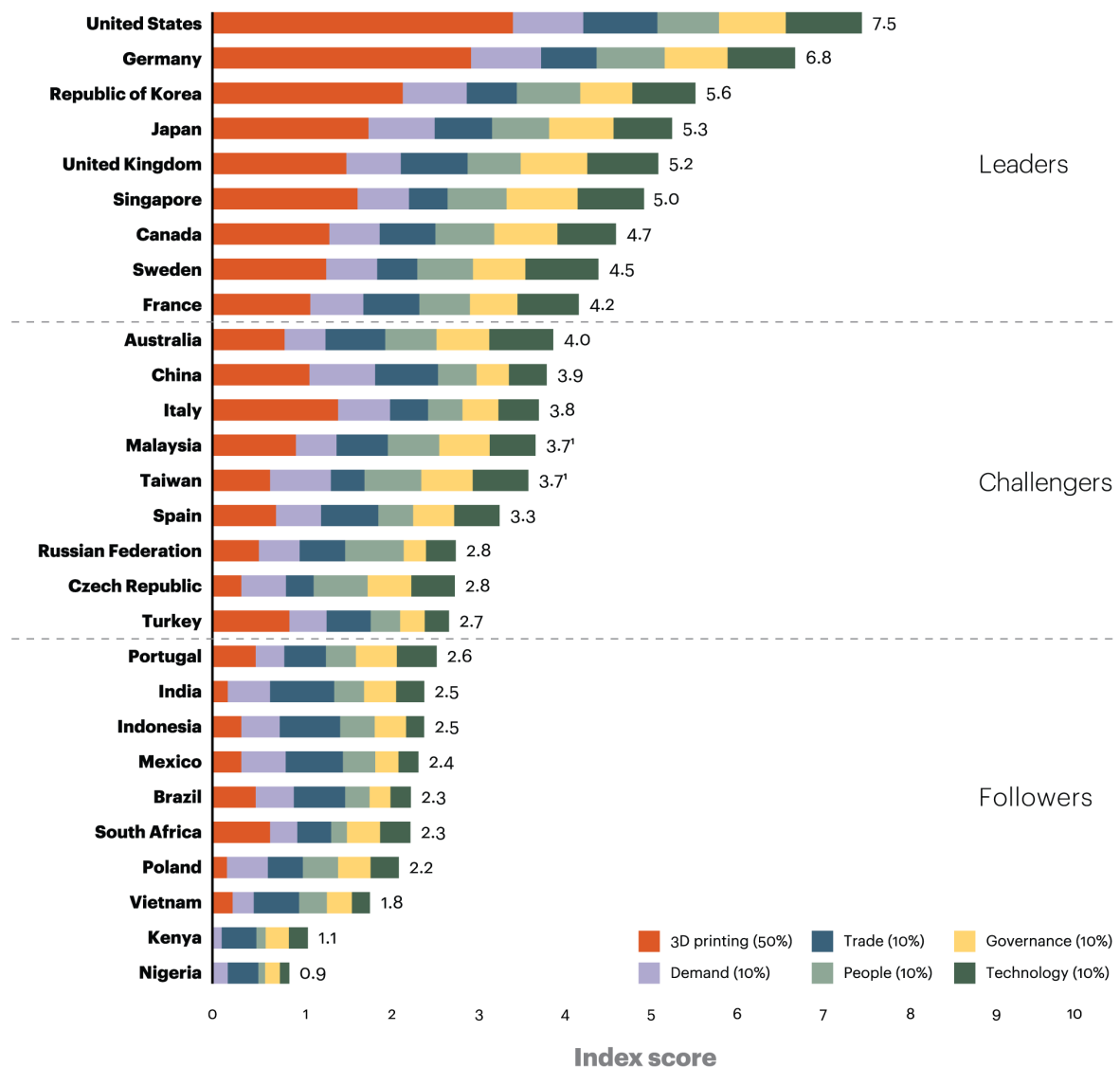
5.1 Utilização da impressora 3D no mundo

Com a impressão 3D alimentando a Quarta Revolução Industrial, uma série de países estão posicionados para obter uma vantagem competitiva, investindo nesta tecnologia de rápido avanço.

Uma pesquisa realizada em 2017 pela Kearney (Wohlers Report 2017) mostra que os Estados Unidos da América do Norte são o líder global em impressão 3D, mas que outros países estão próximos de liderarem, como é o caso da Alemanha (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

A figura abaixo mostra o Índice de Impressão 3D, o qual mede o grau que uma série de habilidades de trabalho, capacidades industriais, governança e ativos econômicos de 28 países que apoiam a manufatura aditiva, com o intuito não só identificar a posição de cada país, mas também de esclarecer o que pode ser feito para melhorar o cenário. O estudo se baseou em 6 dimensões: (1) Capacidade de Impressora 3D, Macroeconomia - (2) Demanda, (3) comércio, (4) Pessoas, (5) Governança e (6) Tecnologia.

The 3D Printing Index assesses each country on six dimensions



¹ Discrepancy in bar length due to rounding.
Source: A.T. Kearney analysis

Figura 26 – Índice de impressão 3D por país
(Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017)

Conforme mostra a figura, a Coreia, Japão, Reino Unido e Singapura também adotaram a tecnologia e começaram a capitalizar a oportunidade. Já a Austrália e China, embora atrasados, têm a oportunidade de capitalizar a tecnologia que os “líderes” desenvolveram (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

Os países “líderes”, identificados logo acima no gráfico, se destacam tanto em recursos de impressão 3D quanto em indicadores macroeconômicos. Os Estados Unidos da América do Norte estão em primeiro lugar porque a indústria americana tem experimentado e adotado a tecnologia em sua fase inicial e

desenvolveu um portfólio significativo de propriedade intelectual. A Alemanha está em segundo lugar com possivelmente o nível mais forte de consciência e desejo de adotar a impressão 3D e outras tecnologias de fabricação avançadas. A Coreia, Reino Unido e Cingapura também se concentraram na expansão da impressão 3D (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

Os países identificados no meio do gráfico, os “desafiadores”, têm amplos recursos para se destacar na impressão 3D, mas ainda não os capitalizaram para alcançar os “líderes”. Por fim, os países identificados no final do gráfico, os “seguidores”, não possuem todos os fatores macroeconômicos para adotar a impressão 3D e para seguir em frente, precisarão do envolvimento do governo e de políticas que promovam a adoção de tecnologia e o desenvolvimento de infraestrutura (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

Os países que estão acelerando a impressão 3D estão desenvolvendo um ecossistema 3D abrangente. Muitos dos países de crescimento mais rápido têm governos altamente engajados que estão impulsionando a capacidade e o ecossistema, pois percebem o vasto potencial econômico da impressão 3D para sua base de manufatura (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

Os “líderes” e os “desafiadores” precisarão de um roteiro nacional que priorize a educação da força de trabalho, impulse a demanda e incentivos para reduzir as barreiras em programas de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) para implementação das impressoras 3D. Os formuladores de políticas com visão de futuro também aproveitarão as vantagens das parcerias público-privadas para trabalhar ao lado do ecossistema em desenvolvimento. Por exemplo, instituições privadas podem fazer parceria com universidades para encontrar maneiras de usar a impressão 3D para resolver problemas da indústria da construção. Isso não apenas ensinará aos alunos (a força de trabalho de amanhã) como projetar produtos com o uso da tecnologia de impressão 3D, mas também incentivará a indústria a adotar a tecnologia com todo o seu potencial (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

Nos próximos anos, a impressão 3D criará valor econômico e uma série de novos empregos. Os países que desejam vencer esta corrida e capitalizar na tecnologia devem expandir seu envolvimento com o governo para promover a adoção da tecnologia e desenvolver um ecossistema 3D abrangente (Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, 2017).

O gráfico evidencia a disparidade de países mais desenvolvidos, onde existe grande utilização das impressoras 3D, especialmente se tratando dos Estados Unidos da América do Norte e da Alemanha. Porém, se olharmos o gráfico como um todo, ele mostra claramente que outras questões, a citar investimento em tecnologia e incentivos do governo, são relativamente parelhos em todos os países,

exceto Kenya e Nigéria, os quais não existe utilização alguma de impressoras 3D. Em se tratando de demanda, é possível perceber que todos os países possuem alguma demanda que justificaria o uso de impressoras 3D.

Isto sugere que, não existe uma dependência apenas de pesquisa em tecnologia, incentivos do governo ou capital econômico, mas sim, uma diferença de interesses dos países em desenvolverem e utilizarem as impressoras 3D. Um exemplo é a China, com grande potencial econômico para investimento nesta tecnologia, mas ainda se vê pouca utilização se comparado aos países que aparecem como “líderes” no gráfico.

Portanto, visando elucidar os interesses e perspectivas na utilização das tecnologias AM no futuro, a próxima seção tratará sobre este assunto.

5.2 Perspectivas para o futuro das impressoras 3D

A quarta revolução industrial está emergindo e trazendo junto uma mudança em massa no que diz respeito a tecnologia, empregos, políticas governamentais e economias inteiras em todo o mundo. Isso representa uma oportunidade única para que os líderes globais se reúnam e adotem novas tecnologias digitais que aumentem suas perspectivas econômicas, criem novos empregos, eduquem a próxima geração de mão de obra altamente qualificada e, por fim, moldem as gerações futuras para essa nova realidade (Weisler, 2018).

Uma transformação fundamental está ocorrendo na construção civil devido a evolução da digitalização, na medida em que as avançadas tecnologias (como exemplo das impressoras 3D) se tornam mais acessíveis e em que cadeias de suprimentos digitalizados se tornem mais rápidas, mais baratas, mais sustentáveis e otimizadas (Weisler, 2018).

Diversas empresas estão com esforços coordenados e criando laboratórios de experimentação de novas soluções, ficando claro que a evolução digital está intensificando as transformações na indústria da construção. Os líderes estão diante de uma escolha entre criar um futuro mais brilhante em seus negócios / países ou correr o risco de ficar para trás (Weisler, 2018).

Neste histórico de mudanças, empresas, governos, cidadãos e suas comunidades devem trabalhar juntos em cooperação, pois, assim, impactarão todos os aspectos da sociedade - comércio, educação, manufatura, política internacional, segurança, sustentabilidade, força global de trabalho, etc (Weisler, 2018).

A transformação nunca é simples e haverá milhares de novas *startups* (termo utilizado para classificar novas empresas que oferecem produtos inovadores no que diz respeito às soluções tecnológicas) experimentando possibilidades e desafiando empresas já consolidadas, o que não é ruim, visto que inovação e competição são a força essencial para o progresso. A história mostra que a inovação deve estar associada a um empreendedorismo astuto para ter sucesso, e neste caso não será exceção (Weisler, 2018).

À medida que a impressão 3D amadurece e mostra uma grande capacidade de produção de quantidade, é cada vez mais fundamental que a inovação tecnológica aconteça em parcerias estratégicas e duradouras entre governo, indústria e academia para iniciar a reinvenção digital da manufatura (Weisler, 2018). Para transformar o estado atual das práticas da indústria da construção, são necessárias inovações na maneira como a construção é realizada (Delgado Camacho et al., 2018).

Para a construção de um ecossistema de impressão 3D bem-sucedido e sustentável voltado para a um mundo totalmente digitalizado, existem três catalisadores principais necessários (Weisler, 2018):

(1) Educação: Os líderes globais precisam priorizar a criação de novos programas educacionais e incentivos para um treinamento abrangente em design 3D, engenharia e as diversas habilidades associadas. Isso envolve não apenas a criação de oportunidades para treinamento e educação da força de trabalho, mas também fornecer a educadores e instituições o financiamento de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) de que precisam para promover o crescimento das capacidades de manufatura digital e dos ecossistemas em todo o mundo. Atualmente países como China, Reino Unido, Canadá e Cingapura já investiram centenas de milhões de dólares para aprimorar os recursos de engenharia e reimaginar o design e a produção para a tecnologia 3D. Porém, isso é só um começo, é necessário investimento para ajudar a criar novos programas educacionais e construir uma força de trabalho global com experiência em tecnologia e qualificação em operações, engenharia, logística, gestão e outras funções relacionadas.

(2) Adoção: A mudança econômica e social será generalizada, e os países, líderes empresariais e cidadãos globais devem compreender o enorme valor e oportunidade que advém da transformação analógica para digital da manufatura. Empregos e economias inteiras mudarão ao redor do globo conforme a manufatura passa a ficar mais perto dos consumidores e em lugares onde a impressão 3D e outras tecnologias digitais estão sendo plenamente realizadas. A indústria da construção está em um histórico ponto de inflexão tecnológica e econômica, e os países na vanguarda da manufatura digital garantirão seu lugar de liderança e inovação globais nas próximas décadas.

(3) Incentivos: Os governos podem acelerar ecossistemas 3D robustos e sustentáveis em suas geografias, incentivando diretamente os investimentos e o desenvolvimento de recursos de manufatura digital por meio de incentivos fiscais e subsídios diretos. A China, por exemplo, embarcou na iniciativa “Made in China 2025” promovendo modelos de incentivos significativos para a impressão 3D. A Alemanha, a Índia e o Japão anunciaram suas próprias iniciativas desse tipo, mas mais países precisam se unir se quiserem ter experiência em manufatura digital em seus mercados.

É preciso uma união de esforços focada no sentido de criar domínio de toda a capacidade da manufatura aditiva, para fazer produtos de forma a otimizar o tempo, qualidade e resultado como um todo. É importante o envolvimento de vários setores - dentre eles, governo, indústria e universidade - para que isso ocorra da melhor maneira possível. Isso quer dizer, fomentar a produção.

Entende-se que é uma troca desses três principais pilares (governo, indústria e universidade), onde a influência do governo vem das leis de incentivos fiscais para a indústria. E com isso, as indústrias verão que poderão investir recursos, sabendo que vão se beneficiar desta tecnologia e das transformações que sua evolução possa trazer. A influência da universidade se dá a partir da educação dos estudantes, visto que ela é responsável por formar profissionais mais capacitados para desenvolver, aprimorar e a operar essa tecnologia.

Abordado neste capítulo sobre os avanços e perspectivas da impressora 3D no mundo, o próximo capítulo faz uma revisão sobre o assunto abordado no âmbito deste trabalho com o intuito de fundamentar e justificar a implementação das impressoras 3D na indústria da construção.

6. REVISÃO E FUNDAMENTOS PARA A UTILIZAÇÃO DE IMPRESSORAS 3D

Este capítulo tem o objetivo de fazer uma revisão sobre os desafios e problemas atuais da indústria da construção, identificados no *Capítulo 2.4* do presente trabalho, de modo a perceber quais poderão ser supridos com a utilização das impressoras 3D e trazer, com isso, vantagens competitivas às empresas de construção.

Importante destacar que a indústria da construção enfrenta outros desafios e problemas, para além dos listados neste trabalho, os quais não foram mencionados por não conterem uma relação com o processo de construção e, sendo assim, não necessariamente relacionados às impressoras 3D e o que elas podem solucionar.

Os desafios e problemas foram, portanto, enumerados, conforme demonstrado na Tabela 2, em 23 aspectos. Concluiu-se que das questões levantadas, quase todas poderão ser compensadas com a implementação das impressoras 3D nas atividades da indústria da construção, com exceção da de número (22) “caracterização do espaço de obra”, conforme explicação detalhada a seguir.

Tabela 3 – Dificuldades e desafios supridos com o uso da impressora 3D

DIFICULDADES E DESAFIOS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO	SOLUCIONA COM A UTILIZAÇÃO DE IMPRESSORAS 3D?
1) Ambientes remotos e de difícil acesso	✓
2) Condições insalubres de trabalho	✓
3) Técnicas e ferramentas rudimentares e perigosas	✓
4) Mão de obra com baixa qualificação e escassa	✓
5) Equipamentos de proteção individual e coletivo negligenciados	✓
6) Dificuldade em adotar novos métodos de produção	✓
7) Baixo índice de digitalização	✓
8) Projetos mais complexos e competitivos	✓
9) Pouca partilha de conhecimento entre empresas do mesmo setor	✓
10) Desperdício de materiais em obra (resíduos)	✓
11) Alto consumo de energia e matéria-prima (poluentes)	✓
12) Escassez de recursos	✓
13) Baixa produtividade	✓
14) Alta frequência de atrasos na entrega da obra	✓
15) Dificuldade em orçamento (excede orçamento)	✓
16) Retornos financeiros baixos e voláteis	✓
17) Projetos resultam em produtos únicos	✓
18) Regulamentações, leis e normas	✓
19) Comunicação complexa	✓
20) Informações não integradas	✓
21) Logística complexa	✓
22) Caracterização do espaço de obra	–
23) Intempéries, doenças (Covid-19)	✓

Fonte: desenvolvido pelo autor

1. Ambientes remotos e de difícil acesso: Nem sempre os projetos de engenharia são construídos no principal local de negócios da organização, mas podem geralmente ser construídos em locais remotos ou de difícil acesso, como em mar aberto, sob a superfície da terra, nas alturas ou até mesmo em outros planetas para exploração, habitação e colonização planetária futura (estudos da NASA) (Project Management Institute, 2016). A impressora 3D solucionaria estes problemas, pois ela pode ser transportada ao local remoto ou de difícil acesso, onde pode operar de maneira autônoma sem a necessidade da presença humana. Outro potencial são as construções para fins militares, criando bases do exército de forma rápida e com menos pessoas envolvidas nestes ambientes, muitas vezes hostis.
2. Condições insalubres de trabalho: O ambiente de trabalho da construção tem característica de ambiente insalubre, com alto risco à saúde e à segurança humanas (Delgado Camacho et al., 2018). A automatização da construção promove a melhoria das condições de trabalho e

segurança do trabalhador, reduzindo a sua exposição em ambientes adversos. O trabalho manual e a força muscular serão significativamente reduzidos, com equipamentos sofisticados e com maior segurança.

3. Técnicas e ferramentas rudimentares e perigosas: Os ambientes de obras ainda predominam técnicas e ferramentas rudimentares, ultrapassadas e perigosas, que exigem inclusive grandes esforços físicos. Por consequência, não proporcionam qualidade ao produto final, demanda mais tempo, afetando diretamente a produtividade. A impressora 3D é uma oportunidade para solucionar esta questão tão relevante, pois ela eliminará estas técnicas tradicionais e limitadas.
4. Mão de obra com baixa qualificação e escassa: Muitos são os trabalhadores com baixa escolaridade e sem experiência em construção civil, ou seja, sem preparo para desempenhar os seus ofícios, ocasionando perda de produtividade. As impressoras 3D resolveriam este problema visto que seu uso exige menor demanda por trabalhos manufaturados especializados, haja visto que cada vez mais a mão de obra qualificada se encontra escassa (AUTODESK, 2019).
5. Equipamentos de proteção individual (EPI) e coletivo negligenciados: Mesmo com o alto índice de risco à saúde e segurança humana que as obras proporcionam, este cenário é intensificado pelo fato de atividades de risco serem executadas muitas vezes sem os equipamentos de proteção adequados. Ou quando fazem uso destes equipamentos, são utilizados de forma incorreta. As impressoras 3D solucionam este problema, porque dispensa significativo trabalho humano enquanto elas estão em operação (Delgado Camacho et al., 2018) e, conseqüentemente, elimina a necessidade do uso de EPI. Ainda assim, algumas impressoras precisam ser instaladas e operadas em média por pelo menos uma ou duas pessoas.
6. Dificuldade em adotar novos métodos de produção: Ainda se observa pouca utilização de novas tecnologias na construção devido à resistência na introdução de novos métodos de produção (García de Soto et al., 2018). Enquanto que, para uma máquina, basta programá-la para operar da forma desejada, sem a necessidade de convencer e preparar uma equipe a um novo método de construção. Simplesmente a impressora 3D segue um comando digital, executando de maneira precisa e otimizada.
7. Baixo índice de digitalização: A indústria da construção tem demorado a adotar a digitalização dos processos e ainda depende muito de papel, prejudicando a captura, a análise de dados e a comunicação com as partes envolvidas no projeto, demandando mais tempo e, muitas vezes, perda de informações importantes (McKinsey&Company, 2016). Inclusive, acontece de forma

frequente proprietários e empreiteiros trabalharem com versões diferentes da realidade (McKinsey&Company, 2016). A impressora 3D é diretamente ligada a um computador que, por meio de softwares com base em BIM, a comanda a partir de um modelo digital. Portanto, ela elimina os intermediários comuns em um ambiente de obra tradicional, melhorando a forma como os projetos são criados e construídos, possibilitando uma melhor distribuição das informações a todas as áreas envolvidas no projeto.

8. Projetos mais complexos e competitivos: Os projetos de construção estão se tornando cada vez maiores em escala, mais complexos e mais competitivos globalmente (Project Management Institute, 2016). As técnicas de impressões 3D permitem produzir geometrias complexas, que antes seriam difíceis ou impossíveis e caras (Delgado Camacho et al., 2018). Esse benefício potencial oferece mais oportunidades de novos projetos e formas, sem afetar a complexidade e produtividade da construção.
9. Pouca partilha de conhecimento entre empresas do mesmo ramo: Muitas empresas especializadas em construção, em um ambiente altamente competitivo, são cautelosas em compartilhar conhecimentos ou tecnologias vantajosas com outras empresas, ocasionando um problema de troca de informações sobre métodos de construção, travancando, assim, as inovações em potencial na indústria (Delgado Camacho et al., 2018). Com a introdução e evolução das impressoras 3D, é provável que este problema seja eliminado, pois a máquina conseguirá se ajustar melhor a partir de um software evoluído, que saberá programá-la automaticamente conforme o nível de complexidade que a obra exige, diferentemente de operários que nem sempre dominam todas as particularidades existentes em diferentes tipos de obras, construindo projetos com maior precisão, rapidez e qualidade.
10. Desperdício de materiais em obra (resíduos): Um dos assuntos mais relevantes e preocupantes na construção é a grande quantidade de desperdício de materiais, destacando-se como a maior geradora de resíduos, nos processos atuais de construção, em comparação com outras indústrias (AUTODESK, 2019). O benefício das impressoras 3D é que não há desperdício de materiais e tem uma redução nas cofragens (e estruturas temporárias relacionadas) utilizadas durante a construção (Delgado Camacho et al., 2018), reduzindo, inclusive, o custo e o tempo associado à colocação e à desmontagem dessas estruturas.
11. Alto consumo de energia e matéria-prima (poluentes): Segundo pesquisas realizadas, os edifícios consomem 40% da energia global e 40% de matéria-prima do mundo (AUTODESK, 2019).

Estudos mostram que a automação da indústria da construção pode reduzir o consumo de energia, ter uma redução considerável de matéria-prima e redução na formação de poluentes. As impressoras 3D não desperdiçam tantos recursos da natureza e, portanto, tem fator sustentável.

12. Escassez de recursos: Com uma população em rápido crescimento em um mundo de recursos cada vez mais escassos (AUTODESK, 2019), a indústria da construção precisará encontrar maneiras de construir mais com menos. Por este fato, as impressoras 3D são vantajosas, porque necessitam de menos recursos naturais para construir e geram menos resíduos, visto que elas seguem precisamente um modelo digital.
13. Baixa produtividade: A construção civil continua atrasada em produtividade de trabalho em relação a outras indústrias (Mechtcherine et al.,2019). Pesquisas realizadas, no âmbito deste trabalho, apontam que a digitalização e a automação de todas as etapas relevantes, desde o design e o planejamento até o processo de construção de fato, parece ser a principal solução viável para superar os desafios urgentes e garantir maior produtividade (Mechtcherine et al., 2019).
14. Alta frequência de atrasos na entrega da obra: Pesquisas mostram que projetos levam geralmente 20% a mais do tempo programado para finalizar, podendo chegar há anos de atraso ou até mesmo a não entrega do projeto final; gerando multas e reclamações (Project Management Institute, 2016). As impressoras 3D trabalham 24 horas por dia e 7 dias por semana, se necessário, são muito mais ágeis que o trabalho humano.
15. Dificuldade em orçamento: Pesquisas mostram que projetos ultrapassam até 80% do orçamento inicial, resultando, não raro, em baixo retorno financeiro ou até mesmo prejuízo (McKinsey&Company, 2016). Uma impressora 3D vai operar sob o comando de um computador e software, seguindo um projeto, e independe de outros fatores que na construção convencional incide (falta de material e mão-de-obra, mau tempo, etc). Isso garante uma melhor previsão de operação e gastos. Inclusive uma plataforma integrada de planejamento de projeto (BIM 5D) permite efetuar orçamentos mais assertivos, em tempo real com o design (BIM 3D) e o cronograma do projeto (BIM 4D) (McKinsey&Company, 2016).
16. Retornos financeiros baixos e voláteis: Os retornos financeiros para os empreiteiros costumam ser relativamente baixos e voláteis (McKinsey&Company, 2016). A baixa produtividade, os problemas com orçamento, atrasos na obra e todos os problemas na construção identificados,

recaem diretamente sobre os custos finais de uma obra. Estudos têm mostrado que a utilização das impressoras 3D podem reduzir os custos e acelerar a construção (Mechtcherine et al., 2019), melhorando a qualidade e a segurança do trabalho, e a curta duração do projeto tende a reduzir os custos com financiamento (Contour Crafting Corporation, n.d.). Além disso, é possível construir geometrias complexas com as impressoras 3D sem custo adicional.

17. Projetos resultam em produtos únicos: Os projetos de construção geralmente resultam em um produto único e exclusivo, e não em produção em série, como ocorre nas outras indústrias. Cada projeto apresenta seus próprios desafios (Project Management Institute, 2016). Com as impressoras 3D isso não seria um problema, pois elas podem fabricar diversas peças, de diversos modelos e complexidades, sem demandar muito tempo como as construções convencionais. Além disso, as impressoras 3D podem trabalhar em diversos turnos, diferente da mão de obra humana que é limitada em horas diárias e exige equipes diferentes para cada turno para agilizar a execução de uma obra.
18. Regulamentações, leis e normas: Os projetos de construção seguem normas e regulamentos locais, globais ou específicos, em que o projeto será executado (Project Management Institute, 2016). Estas normas e regulamentos vão continuar existindo, porém, o que pode ocorrer é uma maior facilidade no cumprimento destas exigências com a utilização das impressoras 3D, devido suas inúmeras características benéficas, vistas anteriormente, de serem mais ecológicas, seguras, mais produtivas e etc.
19. Comunicação complexa: A comunicação em ambiente de construção apresenta desafios especiais devido ao grande número de pessoas que se reúnem por curtos períodos de tempo e devido à natureza multidisciplinar das equipes de projeto para todas as áreas da construção civil. Além disso, a natureza dinâmica, a distância entre o escritório central da organização e o local da obra, os idiomas técnicos, o contexto organizacional e cultural, além de muitos outros fatores podem causar distorção das informações transmitidas (Project Management Institute, 2016). A impressora 3D exige menos pessoas trabalhando em obra, agilizando assim a comunicação e gerando menor necessidade de fluxo de informações, uma vez que as impressoras 3D trabalham sob comando de um computador ligado à plataforma integrada, com sincronização das informações, eliminando, assim também, as diversas ferramentas de software não integrados.
20. Informações não integradas: Pela precária ou inexistente digitalização das informações na indústria da construção, sendo muitas ainda feitas em papel, o compartilhamento de

informações entre equipes dispersas geograficamente é prejudicado, podendo chegar com atraso ou com informações incompletas (Project Management Institute, 2016). Além do que é frequente proprietários e empreiteiros trabalharem com versões diferentes de um projeto. A utilização de papel torna inclusive difícil de capturar e analisar dados, demandando mais tempo (McKinsey&Company, 2016). Com inserção de novas tecnologias como as impressoras 3D, a tecnologia moderna é integrada ao processo de construção. A colaboração digital e digitalização dos processos do início ao fim vai possibilitar compartilhamento de informações online e em tempo real, garantindo transparência e resultados mais confiáveis.

21. Logística complexa: Uma cadeia de suprimentos eficiente de materiais e equipamentos necessária para a entrega do projeto e navegar pelos diversos fluxos de trabalho entre vários participantes do projeto torna-se um complexo desafio (Project Management Institute, 2016). A utilização das impressoras 3D oportuniza o encolhimento da cadeia de suprimentos, principalmente para materiais que precisam ser entregues rapidamente. Isto porque elas permitem que peças personalizadas sejam impressas por demanda a partir de um modelo 3D digital, que não exige tempo de entrega significativo. O uso das impressoras 3D poderia reduzir o número de etapas envolvidas na cadeia de suprimentos, onde, ao invés de ter diversas empresas produzindo componentes diferentes, cada componente pode ser produzido diretamente usando-se a própria impressora 3D (Apis cor, n.d.). Isso resolveria o problema da baixa produtividade devido a entregas tardias pelos fornecedores no local de trabalho. A figura 24, apresentada anteriormente, mostra uma comparação do processo da construção tradicional com o de uma impressora de construção 3D capaz de eliminar significativamente a quantidade de fases na construção.
22. Caracterização do espaço de obra: Os projetos de construção precisam abordar simultaneamente a geografia, suas características geotécnicas, as condições do local, as comunidades, os ambientes físicos e a infraestrutura existente (Project Management Institute, 2016). São questões que continuarão tendo que ser avaliadas, independente do uso da tecnologia empregada.
23. Intempéries, doenças (Covid-19): Como exemplo de um acontecimento recente, a Covid-19 paralisou diversas empresas de produzirem, inclusive as da indústria da construção, devido ao alto risco de contágio no contato entre as pessoas (World Economic Forum, 2020). A construção, por ter suas atividades ainda muito presenciais e sem possibilidade de manter a produtividade

de forma remota, o distanciamento social se tornou um desafio e muitas empresas tiveram graves consequências financeiras. A chegada da pandemia mostrou às empresas a necessidade de pensar no futuro mais digitalizado e robotizado para a sobrevivência em um mercado que exige cada dia mais agilidade e flexibilidade nos sistemas de produção e cadeias de abastecimento (World Economic Forum, 2020). A automação de tarefas está ajudando a operar com menos pessoas, com uma redução considerável da mão de obra no local do projeto, especialmente quando as novas tecnologias e soluções de monitoramento de máquinas são usadas como força de trabalho remota para controlar a produção mesmo de casa (World Economic Forum, 2020). Importante destacar que além da Covid-19, existem outras causas de paralisações na produção, como as intempéries. Impressoras 3D podem construir abrigos de emergência de forma rápida, em poucas horas, para reconstrução de emergência em locais devastados por terremotos, inundações, guerras e outros desastres naturais.

Como visto acima, as impressoras 3D têm grande potencial de utilização e evolução das atividades na construção civil ainda muito arcaicas, insalubres e ineficientes para os tempos atuais, onde o atraso nas entregas, excedência de orçamentos, acidentes graves e fatais frequentes, já não são mais tolerados. A construção há muitos anos está atrás no que diz respeito às tecnologias e novas formas de trabalho e produção, abalando a imagem da indústria da construção nos dias de hoje, sendo considerado um dos mercados mais importantes do mundo.

Para o desenvolvimento e implementação das impressoras 3D na construção civil, são necessárias mais pesquisas e desenvolvimento com colaboração entre empresas e universidades, no sentido de promover a evolução desta tecnologia promissora e revolucionária. Também existe a necessidade de incentivos fiscais do governo e aportes de capital das grandes empresas, gerando novos produtos de qualidade elevada. Outra questão são as mudanças na educação, incorporando disciplinas voltadas às impressoras 3D e outras altas tecnologias, visando um futuro mais dinâmico, mais automatizado e robotizado.

Assim sendo, a digitalização será capaz de criar um projeto de construção, minimizando qualquer falha e erro que vem em projeto, além de poder visualizar uma obra de forma virtual, onde a qual o interessado consegue visualizar a obra virtualmente, antes de ela existir de fato, por meios de ferramentas BIM, por exemplo. Desta forma, obtendo uma noção do projeto final e possibilitando fazer modificações antes da execução e conclusão deste projeto.

Inclusive, a impressora 3D conectada, seguindo o comando de um computador, consegue de forma precisa executar o que foi programado no projeto, eliminando-se, assim, o tempo gasto nas fases das quais existem no modo clássico analógico, para fazer algo com qualidade superior.

7. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 Conclusões

A presente dissertação de Mestrado, com o título “Automação na construção civil: o avanço das impressoras 3D” foi desenvolvida no contexto do ensino superior, especificadamente no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho.

Buscou-se uma revisão atualizada sobre a tecnologia de impressão 3D, com o objetivo principal de identificação do progresso da construção civil no contexto atual com a utilização das impressoras 3D. Observou-se significativas vantagens do uso desta tecnologia no campo da indústria da construção, o que vem trazendo interesse e sua adoção em diversos países desenvolvidos. Ressalta, ainda, que muito deve-se fazer para esta tecnologia se tornar realidade, mas, evidentemente, por todos os benefícios, é um advento promissor.

Em um primeiro momento, foi detalhado os conceitos abrangentes desta tecnologia, também chamada de tecnologias AM (Manufatura Aditiva) e relatada uma breve história sobre as revoluções industriais e da automação na indústria da construção, para perceberem-se melhor os desafios e dificuldades existentes na construção civil e as oportunidades num contexto atualizado.

Com o intuito de elucidar o que são as impressoras 3D e como elas funcionam, fez-se um estudo sobre os potenciais e as desvantagens de sua aplicação, dos principais processos e métodos de impressão 3D na construção, que são denominadas por *Countour Crafting* (CC), *D-Shape*, *Concrete Printing*, *Mesh Mould* e *Dfab*.

Posteriormente, para identificar o avanço destes métodos na aplicação das impressoras 3D, buscou-se mostrar alguns modelos existentes no mercado, com maior peso de desenvolvimento, dentre eles: *Countour Crafting Corporation (CC Corp.)*, *D-Shape®*, *CONPrint3D®*, *COBOD*, *Apis Cor* e *Sika*. Todas estas impressoras, exceto a *D-Shape®*, tem um processo semelhante entre si, sendo o de extrusão de uma pasta cimentícia, estudada e desenvolvida especificamente para estas máquinas. A *D-Shape®* baseia-se no método de leito de pó.

Aqui percebeu-se haver pouca informação sobre as impressoras 3D, evidenciando um sigilo geral entre as empresas criadoras, inviabilizando pesquisas mais detalhadas.

Posteriormente foram abordados os avanços das impressoras 3D no mundo, com uma pesquisa sobre sua utilização em diversos países e as vantagens que elas podem trazer à indústria da construção.

Foi realizada uma revisão do trabalho, com o objetivo de identificar os desafios e problemas da construção civil que poderão ser supridos com a utilização das impressoras 3D e trazer, com isso, vantagens competitivas às empresas de construção.

Foram enumeradas as dificuldades e desafios da indústria da construção, identificados anteriormente, dentre elas: (1) Ambientes remotos e de difícil acesso, (2) Condições insalubres de trabalho, (3) Técnicas e ferramentas rudimentares e perigosas, (4) Mão de obra com baixa qualificação e escassa, (5) Equipamentos de proteção individual e coletivo negligenciados, (6) Dificuldade em adotar novos métodos de produção, (7) Baixo índice de digitalização, (8) Projetos mais complexos e competitivos, (9) Pouca partilha de conhecimento entre empresas do mesmo ramo, (10) Desperdício de materiais em obra (resíduos), (11) Alto consumo de energia e matéria-prima (poluentes), (12) Escassez de recursos, (13) Baixa produtividade, (14) Alta frequência de atrasos na entrega da obra, (15) Dificuldade de orçamento, (16) Retornos financeiros baixos e voláteis, (17) Projetos resultam em produtos únicos, (18) Regulamentações, leis e normas, (19) Comunicação complexa, (20) Informações não integradas, (21) Logística complexa, (22) Caracterização do espaço de obra e (23) Intempéries, doenças (Covid-19).

Concluiu-se que todas as questões levantadas podem ser compensadas com a utilização das impressoras 3D, com a exceção do número 22, pois a caracterização do espaço de obra continuará tendo que ser avaliada, independente do uso da tecnologia empregada.

Uma mudança fundamental está ocorrendo na construção anunciada pela digitalização, onde os processos construtivos podem ser otimizados com menos tempo e dinheiro, a partir de tecnologias avançadas que oferecem maior flexibilidade de design.

A manufatura aditiva (AM), já utilizada em diversas áreas, como a automotiva, aeronáutica e médica, tem uma implementação mais lenta na área da construção civil, principalmente devido às grandes escalas envolvidas e à complexidade da física e química dos materiais utilizados. O concreto tradicional é o material de construção mais econômico e, por isso, a impressão 3D em concreto precisa ser competitiva em relação a esse método tradicional para demonstrar sua eficiência.

Importante destacar que este trabalho começou alguns meses antes da pandemia do novo coronavírus e abordava qualidades da tecnologia AM para solucionar a falta de mão de obra qualificada, mas com advento da doença trouxe ainda mais relevância a este estudo. Portanto, analisou-se as consequências do novo coronavírus na indústria da construção.

Por outro lado, o presente estudo pretendia uma investigação de campo, em laboratórios de empresas e/ou de universidades de desenvolvimento desta tecnologia, o que não foi possível devido às

circunstâncias causadas pelo novo corona vírus, pois as universidades, empresas e fronteiras, entre regiões e países, estavam encerradas ou com acesso limitado, impossibilitando, em consequência disso, acesso a estas informações de extrema importância para o presente trabalho.

Por fim, foram realizadas revisões e fundamentações para a utilização da tecnologia de impressão 3D de forma a fomentar a evolução desta tecnologia promissora e revolucionária, visando um futuro mais dinâmico, mais automatizado e robotizado.

7.2 Trabalhos futuros

O futuro desta tecnologia na indústria da construção é promissor e espera-se que com este trabalho venha servir como fonte de dados para pesquisas futuras de interessados sobre o assunto, não excluindo também a possibilidade da continuidade deste trabalho para um próximo ciclo de estudo.

Recomenda-se para trabalhos futuros um seguimento deste estudo realizado, com pesquisas de campo, diretamente em laboratórios de desenvolvimento das impressoras 3D, com objetivo de perceber melhor o aperfeiçoamento que esta tecnologia necessita para uma evolução consistente com todo seu potencial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agustí-Juan, I., & Habert, G. (2017). Environmental design guidelines for digital fabrication. *Journal of Cleaner Production*, 142, 2780–2791. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.190>
- Apis cor. (n.d.). *Apis cor*. Retrieved July 8, 2020, from <https://www.apis-cor.com>
- AUTODESK. (2019). *ROBOTICS IN CONSTRUCTION*. <https://bim360resources.autodesk.com/ebooks/robotics-in-construction-pdf>
- Ben T. Smith IV, Bharat Kapoor, R. A. (2017). *3D printing: disrupting the \$12 trillion manufacturing sector*. <https://www.de.kearney.com/operations-performance-transformation/article/?a/3d-printing-disrupting-the-12-trillion-manufacturing-sector>
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., & Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430–450. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>
- Construction Equipment. (n.d.). *Bechtel Using Wax and 3D Printing to Build London Tube*. Retrieved July 22, 2020, from <https://www.constructionequipment.com/bechtel-using-wax-and-3d-printing-build-london-tube>
- Contour Crafting Corporation. (n.d.). *Offering Automated Construction of Various Types of Structures*. Retrieved July 29, 2020, from <https://contourcrafting.com/building-construction/>
- D-Shape. (n.d.). *D-Shape*. Retrieved July 30, 2020, from <https://d-shape.com>
- Delgado Camacho, D., Clayton, P., O'Brien, W. J., Seepersad, C., Juenger, M., Ferron, R., & Salamone, S. (2018). Applications of additive manufacturing in the construction industry – A forward-looking review. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.031>
- Direção-Geral da Saúde. (2020). *COVID-19*. <https://covid19.min-saude.pt>
- ENGENHEIROS, O. DOS. (2020). *ORDEM DOS ENGENHEIROS PANDEMIA SARS-COV-2 (COVID-19) ESTALEIROS DE CONSTRUÇÃO RECOMENDAÇÕES PARA PREVENÇÃO DO CONTÁGIO*.
- Fabio Gramazio, M. K. (2008). *Digital Materiality in Architecture*.
- Flanders. (n.d.). *World's first house rolls off the 3D printer in Flanders*. Retrieved November 2, 2020, from <https://www.flandersinvestmentandtrade.com/invest/en/news/worlds-first-house-rolls-3d-printer-in-flanders>
- García de Soto, B., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G., & Adey, B. T. (2018). Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>
- Gerbert, P., Castagnino, S., Rothballer, C., Renz, A., & Filitz, R. (2016). Digital in Engineering and Construction: The Transformative Power Of Building Information Modeling. *The Boston Consulting Group Digital in Engineering and Construction*.
- Hamidi, F., & Aslani, F. (2019). Additive manufacturing of cementitious composites: Materials, methods, potentials, and challenges. In *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.140>
- Holanda, A. B. de. (2010). *Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa* (8ª).
- IBM. (n.d.). *Controle e Automação de Processos Empresariais*. Retrieved June 24, 2020, from <https://www.ibm.com/br-pt/automation>
- INSIDER, B. (2020). *The house is two floors, a first and a breakthrough in the world of 3D printed construction*. <https://www.businessinsider.com/kamp-c-3d-printed-two-story-house-in-belgium-2020-8#the-house-is-two-floors-a-first-and-a-breakthrough-in-the-world-of-3d-printed-construction-3>
- ISO/ASTM. (2015). *ISO/ASTM 52900:2015(E), Standard Terminology for Additive Manufacturing – General Principles – Terminology 1,2*. <https://doi.org/10.1520/ISOASTM52900-15>

- KAMP C. (n.d.). *3D-printen in de bouw*. Retrieved November 2, 2020, from <https://www.kampc.be/c3po>
- Keating, S., & Oxman, N. (2013). Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(6), 439–448. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2013.05.001>
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- Lowke, D., Dini, E., Perrot, A., Weger, D., Gehlen, C., & Dillenburger, B. (2018). Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and challenges. *Cement and Concrete Research*, 112, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018>
- McKinsey&Company. (2016). *Imagining construction's digital future*. [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital Projects and Infrastructure/Our Insights/Imagining constructions digital future/Imagining-constructions-digital-future.pdf](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Imagining%20constructions%20digital%20future/Imagining-constructions-digital-future.pdf)
- Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Will, F., Näther, M., Otto, J., & Krause, M. (2019). Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
- Norman Hack, Timothy Paul Wangler, Jaime Mata-Falcón, K. D. (2017). *MESH MOULD: AN ON SITE, ROBOTICALLY FABRICATED, FUNCTIONAL FORMWORK*. https://www.researchgate.net/publication/314952069_MESH_MOULD_AN_ON_SITE_ROBOTICALLY_FABRICATED_FUNCTIONAL_FORMWORK
- PERI. (n.d.). *3D Construction Printing*. Retrieved November 2, 2020, from <https://www.peri.com/en/business-segments/3d-construction-printing.html>
- Project Management Institute. (2016). *Constructlon Extenslon to the PMBOK guide*.
- pwc. (2020). *Engineering & Construction in a post-COVID world: weathering the storm*. <https://www.pwc.com/gx/en/issues/crisis-solutions/covid-19/engineering-construction-post-covid-world.html>
- Schwab, K. (2016). *The Fourth Industrial Revolution* (Edipro (ed.)).
- SIKA. (n.d.). *SIKA LEADS THE WAY IN 3D CONCRETE PRINTING*. Retrieved November 18, 2020, from <https://www.sika.com/en/knowledge-hub/3d-concrete-printing.html>
- SINDUSCON-RS. (2020). *CARTILHA ORIENTATIVA CORONAVÍRUS COVID-19 (2ª)*.
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>
- Tibbits, S., McKnelly, C., Olguin, C., Dikovsky, D., & Hirsch, S. (2014). 4D printing and universal transformation. *ACADIA 2014 - Design Agency: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*.
- Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M., & Gambao, E. (2013). Extending automation of building construction – Survey on potential sensor technologies and robotic applications. *Automation in Construction*, 36, 168–178. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.002>
- Weisler, D. (2018). *PRINT THE FUTURE The three things global leaders need to do to prepare for the next big economic shift*. <https://qz.com/1188144/hp-ceo-hpq-davos-how-governments-can-get-workers-ready-for-the-fourth-industrial-revolution/>
- Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A. A., Gramazio, F., & Kohler, M. (2016). Robotic timber construction – Expanding additive fabrication to new dimensions. *Automation in Construction*, 61, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.09.011>
- World Economic Forum. (2018). *The Future of Jobs Report 2018*.

World Economic Forum. (2020). *The Impact of COVID-19 on the Future of Advanced Manufacturing and Production Insights from the World Economic Forum's Global Network of Advanced Manufacturing Hubs*

