

IMPRESSÃO 3D PARA CONSTRUÇÃO CIVIL: REVISÃO DA LITERATURA E DESAFIOS

Caio Vinicius Efigenio Formiga (Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC GO) E-mail:

caioeformiga@gmail.com

Marcos Lajovic Carneiro (Pontifícia Universidade Católica de Goiás - PUC GO) E-mail:

marcoslajovic@hotmail.com

Resumo: A manufatura aditiva (impressão 3D) atingiu recentemente a indústria da construção, aumentando a produtividade e reduzindo os recursos humanos para as operações do canteiro de obras. Neste trabalho, é apresentada uma revisão sistemática abrangente da literatura sobre o uso da impressão 3D em atividades de construção. Nesse sentido, as publicações foram analisadas por meio de aplicação de equipamentos, comparação de tecnologias, características, revisão e vantagens. Como principal resultado, são indicadas dez lacunas a serem desenvolvidas sobre o tema: estrutura, materiais, legislação, integridade, projeto, gestão, algoritmos CNC, monitoramento, materiais múltiplos e simulação de processos.

Palavras-chave: impressão 3D em concreto, manufatura aditiva, construção, impressoras 3D de concreto.

3D PRINTING FOR CIVIL CONSTRUCTION: LITERATURE REVIEW AND CHALLENGES

Abstract: Additive manufacturing (3D printing) has recently reached the construction industry increasing productivity and reducing human resources for building site operations. In this work, a comprehensive systematic literature review on 3D printing use in construction activities is presented. In this sense, publications were analyzed using equipment application, comparison of technologies, characteristics, review, and advantages. As the main result, ten gaps to be developed on the theme are indicated: structure, materials, legislation, integrity, design, management, CNC algorithms, monitoring, multiple materials, and process simulation.

Keywords: concrete 3d printing, additive manufacturing, construction, concrete 3d printing printers.

1. Introdução

A impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva (GIBSON et al, 2014), é um processo avançado de fabricação que pode produzir peças com geometrias complexas automaticamente, a partir de um desenho 3D assistido por computador (CAD). Ela está sendo aplicada em diversos campos da indústria devido à algumas vantagens: criar protótipos funcionais em tempo razoável, reduzir o tempo entre a criação e a prototipagem, reduzir o esforço e aumentar o impacto do planejamento devido o *design* iterativo, aumentar o alinhamento organizacional para acelerar a tomada de decisões, reduzir a intervenção humana, minimizar o desperdício de material e interromper a cadeia de suprimentos tradicional, permitindo a produção de produtos mais perto do ponto de uso no momento da necessidade, melhorando o *lead time*.

Uma aplicação mais recente desta tecnologia, voltada para o ambiente da construção civil pode melhorar as estratégias tradicionais de construção, reduzindo a necessidade de recursos humanos, altos investimentos de capital e fôrmas. O interesse da pesquisa em empregar impressão 3D para construção civil aumentou exponencialmente nos últimos anos, visto que é um setor que tem uma baixa produtividade e tecnologias atrofiadas,

quando comparados a outros setores, que têm automatizado e digitalizado seus processos de fabricação (EL-SAYEGH et al, 2020).

Este artigo realiza uma revisão da bibliografia relacionada a manufatura aditiva na construção civil, apontando o estado-da-arte alcançado, a fim de apresentar os aspectos gerais da impressão 3D em concreto/argamassa com foco nas impressoras 3D. Também são apresentadas lacunas no conhecimento para que futuros trabalhos possam reduzir os desafios e as limitações da impressão 3D na construção civil.

Com a revisão dos artigos, informações importantes sobre impressão 3D foram sintetizadas, tais como descrição dos processos, tipos de impressoras, novos métodos, comparações e lacunas. Os principais desafios encontrados, e que podem ser fruto de futuras pesquisas foram a impressão em escalas maiores, desenvolvimento de materiais adequados, ausência de regulamentações, poucos estudos na área de simulação computacional do processo, estudo da integridade estrutural dos elementos impressos e criação de códigos ou softwares para monitoramento em tempo real do processo.

2. Metodologia da pesquisa

A metodologia de pesquisa para este trabalho foi feita em três etapas: coleta de material, categorização e análise detalhada da literatura.

A busca foi feita em três bases de dados - Google Acadêmico, IEEE e *Web of Science* - e foram utilizados vários conjuntos de termos de busca – “*concrete printer gantry mortar*”, “*3d concrete printer*”, “*3d delta printer mortar concrete*”, “*3d hanging printer mortar*”, “*concrete 3d printer gantry mortar*”, “*concrete printer gantry mortar*” e “*contour crafting*”.

Os artigos selecionados foram categorizados em artigos de revisão bibliográfica, aplicação dos métodos de impressão 3D, comparativo entre construção tradicional e impressão 3D e vantagens. A maioria das publicações relacionadas a esse tema são referentes a materiais, e que não foram considerados neste estudo. O foco desse artigo é apresentar uma visão geral do processo e ao final apontar lacunas, para direcionar futuras pesquisas.

3. Análise detalhada da literatura

3.1. Artigos de revisão bibliográfica

Dentre os modelos de impressoras 3D para a construção civil, o sistema em pórtico e o braço robótico cilíndrico têm se destacado.

O modelo de pórtico representa uma expansão da fabricação aditiva para a construção aditiva – em suma, uma impressora 3D gigante (Figura 1). O bico de extrusão do concreto realiza movimentos de translação em qualquer direção definido pelos eixos X, Y e Z nas coordenadas cartesianas. As soluções de pórtico foram desenvolvidas pela primeira vez para a extrusão em concreto em 2001 e, posteriormente, Khoshnevis, da Universidade do Sul da Califórnia, nos EUA, depositou uma patente combinando este tipo de impressora com um material. Esse processo foi chamado “*Contour Crafting*” (LABONNOTE et al, 2016).

A estrutura de pórtico possui algumas limitações, tais como transporte, instalação e tamanho. Para produzir um componente em larga escala, um sistema de pórtico deve ser maior do que o componente que está sendo construído, gerando várias dificuldades de transporte e instalação. Um outro problema do sistema de pórtico é a deposição ortogonal,

que só permite a extrusão de material perpendicular à superfície de construção, limitando a curvatura para o plano horizontal (CAMACHO et al, 2018).

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



Figura 1 – Impressora 3D de concreto de pórtico
Fonte: EL Sayegh et al, (2020) - adaptado

Outra impressora 3D de concreto muito utilizada é a de sistemas de robôs articulados, que consiste de um braço robótico (Figura 2). Requerem menos espaço do que os sistemas de pórtico e podem ser montados em uma plataforma transportável, facilitando a montagem nos locais de construção. No entanto, elas possuem uma limitação de espaço de trabalho, em comparação com os pórticos, pois seu alcance é limitado pelos altos momentos gerados na base quando o braço do robô atinge sua extensão máxima. Esse sistema é chamado de robô cilíndrico, em que a primeira articulação corresponde a translação vertical, a segunda articulação corresponde a rotação e a terceira corresponde a uma translação telescópica (EL-SAYEGH et al, 2020).

Os braços robóticos fazem caminhos circulares com maior facilidade, porém, os cantos afiados continuam sendo uma limitação. Para estruturas mais complexas, mais de três graus de liberdade são necessários. Mas para uma impressão camada por camada, quatro graus de liberdade já são suficientes, em que o quarto grau se refere a rotação da cabeça em torno do eixo vertical (EL-SAYEGH et al, 2020). Além da extrusão de materiais, os braços robóticos podem executar tarefas auxiliares relacionadas a construção, como pintura, atividades de acabamento e montagens (LABONNOTE et al, 2016).



Figura 2 - Impressão 3D de concreto por um braço robótico fixo
Fonte: EL Sayegh et al, (2020)

Quando o braço robótico é montado em uma estrutura móvel, a escala da impressão pode ser aumentada consideravelmente, sem precisar de uma impressora 3D de grandes dimensões (Figura 3). Quando se utiliza um grupo de robôs móveis, e escala e velocidade de impressão podem aumentar ainda mais. Os *Minibuilders* apresentam uma abordagem alternativa para impressão 3D em concreto, com a utilização de três robôs. O primeiro imprime a base, seguindo um caminho marcado. O segundo imprime camadas adicionais de concreto e o terceiro usa ventosas e ar pressurizado para imprimir verticalmente, reforçando a estrutura previamente impressa (ZHANG et al, 2018).



Figura 3 - Impressão 3D de concreto por um grupo de robôs móveis
Fonte: Zhang et al, (2018)

A fim de se aumentar a área de impressão, robôs acionados por cabos fornecem novas soluções para a manufatura aditiva para a construção civil (Figura 4). Um robô acionado por cabos é essencialmente um conjunto de pelo menos seis cabos, enrolados dentro e fora por guinchos, que conectam um quadro e uma plataforma. Com a definição do comprimento dos cabos de uma maneira síncrona, a carga pode ser movida dentro de um quadro, com controle e estabilidade em todos os seis graus de liberdade. Na construção civil, eles podem ser utilizados para impressão 3D em concreto, assentamento de tijolos e outras montagens (IZARD et al, 2017).

Quando comparados com outros sistemas robóticos de construção, os robôs de cabos são mais baratos e fácil de transportar, montar e desmontar no local. Além disso, a configuração da estrutura baseada em cabos, permite uma maior área de impressão. Ao

contrário dos robôs voadores, eles podem transportar cargas maiores e trabalhar continuamente por meio do fornecimento constante de energia, evitando o uso de baterias. Apesar dessas vantagens, a quantidade e movimentos dos cabos podem causar interferência no espaço de trabalho e sua força na direção descendente é limitada. Outra dificuldade é o controle da precisão devido as forças de tensão e elasticidade dos cabos (SOUZA et al, 2016). A figura 9 ilustra o sistema robótico proposta por Souza et al. (2016).

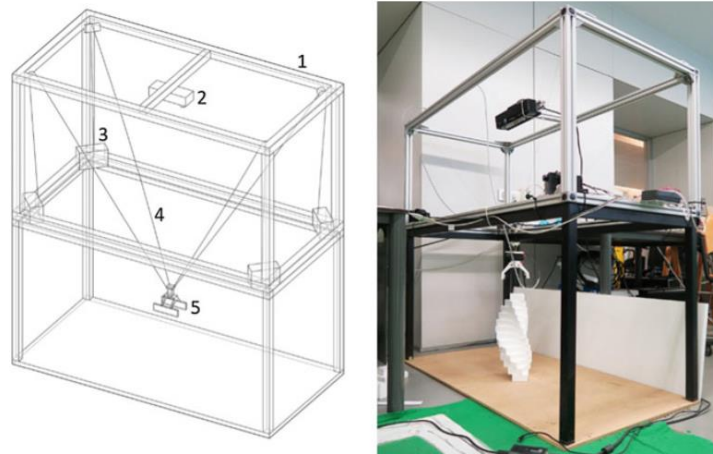


Figura 4 – SPIDERobot: 1 estrutura; 2 sistema de visão; 3 motores; 4 cabos; 5 plataforma móvel
Fonte: Souza et al, (2016)

Baseado na literatura, a maior limitação do sistema de impressão é a falta de escalabilidade. O pórtico e o robô suspenso por cabos tem a limitação de sua estrutura. Aumentando seu tamanho, não se resolve o problema, pois o quão alto deve ser uma estrutura para permitir a construção de um arranha céu? (LABONNOTE et al, 2016). O pórtico e o braço robótico estacionário requerem uma estrutura externa maciça para suportar o bico de impressão. O braço robótico móvel pode aumentar a área de trabalho, mas um único bico de impressão ainda limita a eficiência do equipamento. Os *Minibuilders* requerem uma estrutura de proteção para escalar e, portanto, tem aplicação limitada, pois deve aguardar o concreto impresso adquirir resistência suficiente para poder realizar o trabalho (ZHANG et al, 2018).

Outro desafio são os possíveis efeitos de escala quando métodos desenvolvidos e testados em pequena escala são aplicados em grande escala. Diversos estudos já aplicaram, com sucesso, essa tecnologia em pequena escala, mas ao produzir componentes em larga escala, a estrutura pode comportar-se de maneira diferente enquanto ele estiver em construção ou em seu estado final. Para aplicações estruturais, é necessário trabalho para melhorar o desempenho da ligação intercadas ou fornecer reforço de camada cruzada para aumentar a resistência as forças que atuam através das camadas (CAMACHO et al, 2018).

A solução existente que é talvez a mais facilmente adaptável para a construção aditiva a curto prazo é o uso de braços robóticos polivalentes, principalmente porque eles combinam as vantagens de tamanho limitado e a maturidade da tecnologia. Eles também abrem o campo da construção aditiva para novos métodos de unir materiais. Material pode ter um conceito bem abrangente. Assim, se tijolos podem ser considerados como materiais, a montagem automatizada de tijolos baseado em um modelo digital é teoricamente relevante para a construção aditiva (LABONNOTE et al, 2016). Os braços

robóticos polivalentes podem, então, ser bastante úteis para a impressão de concreto e para recursos de montagem na construção civil.

EL-Sayegh et al. (2020) concluiu que as duas impressoras mais utilizadas são as de pórtico e braços robóticos. A principal diferença entre elas é o tamanho do espaço de trabalho. Os braços robóticos geralmente não alcançam mais de três metros, limitando o tamanho dos objetos impressos. Imprimir uma casa inteira com essa tecnologia talvez não seria possível devido a essa limitação. Assim, duas soluções são propostas: imprimir seções do edifício e depois realizar a montagem e mover o braço robótico ao redor da construção para construir as diferentes partes do edifício. Essas soluções colocam algumas limitações na forma e tamanho do edifício impresso. Uma impressora de pórtico pode estender o alcance de impressão, e uma casa completa pode ser impressa continuamente, sem a necessidade de mover a impressora. Algumas empresas afirmam que, usando um robô de pórtico, um edifício completo de dois andares 12 x 27 x 9 metros podem ser impressos, sem a necessidade de mover a impressora.

Comprovando a conclusão de EL-Sayegh et al. (2020), de que as duas impressoras mais utilizadas são as de pórtico e braço robótico, a Tabela 1 mostra algumas impressoras 3D de concreto comercializadas. Essas empresas foram encontradas através de uma pesquisa na base de dados do *Google*, utilizando o termo “3D concrete printer”. A Tabela 1 organiza os dados pelo nome da empresa, tipo de impressora, fonte e país onde a empresa está localizada. Das nove empresas selecionadas, seis fabricam impressoras do tipo pórtico e três do tipo braço robótico. Cinco delas se localizam nos EUA enquanto as outras estão na Europa, na Dinamarca, Itália, França e Holanda. Teixeira (2018) apresenta alguns trabalhos realizados por universidades, em que todos utilizam ou impressoras 3D de concreto de pórtico ou braço robótico.

Tabela 1 – Empresas que comercializam impressoras 3D de concreto

Empresa	Tipo de impressora	Fonte	Local
Total Kustom LLC	Pórtico	http://www.totalkustom.com/	EUA
Apis Cor	Braço Robótico fixo	https://www.apis-cor.com/	EUA Dinamarca
Cobod	Pórtico	https://cobod.com/	a
WASP	Pórtico	https://www.3dwasp.com/	Itália
Icon	Pórtico	https://www.iconbuild.com/	EUA
SQ4D	Pórtico	https://www.sq4d.com/	EUA
Construction 3D	Braço Robótico fixo Braço Robótico	https://www.construction-3d.com/	França
Cybe	fixo/móvel	https://cybe.eu/	Holanda
MudBots	Pórtico	https://www.mudbots.com/	EUA

Fonte: Próprio autor

3.2. Artigos de comparação

Os estudos de (JAGODA et al, 2020) e (ANTON et al, 2020) mostram um comparativo entre a impressão 3D em concreto e a construção civil tradicional. Foram impressos três pequenos monumentos em concreto (Figura 5) e posteriormente feita uma comparação

com o processo convencional. Concluiu-se que a impressão 3D pode ser utilizada por qualquer pessoa, recebendo apenas poucas horas de treinamento. O número de trabalhadores envolvidos no processo é inferior ao convencional – na fabricação deste banheiro foram utilizadas apenas duas pessoas, uma para monitorar o computador e a outra a bomba. É um processo que pode ser utilizado em diversas aplicações na construção: casas, bases de defesas, aplicações arquitetônicas (JAGODA et al, 2020). Anton et al. (2020) mostra as qualidades arquitetônicas alcançáveis através da impressão de nove colunas de 2,7 metros de altura com geometria complexa.



Figura 5 – Desenho do monumento impresso em concreto
Fonte: Jagoda et al, (2020)

Um dos estudos, feito no contexto de Singapura, (WENG et al, 2020) fabricou uma unidade de banheiro com dimensões 1620 mm x 1500 mm x 2800 mm (Figura 4), com um sistema de braço robótico, uma bomba de concreto e um misturador de material (Figura 5). Custo, emissão de CO₂ e consumo de energia foram mensurados durante o processo para serem comparados ao método tradicional de construção, chegando a uma conclusão de que houve uma redução de 34,1% no custo, 85,9% na emissão de CO₂ e 87,1% no consumo de energia, além da redução no peso total da estrutura.

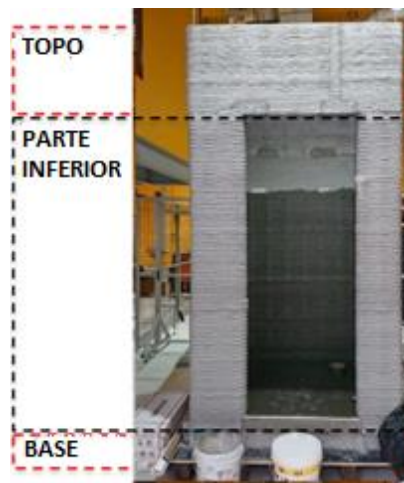


Figura 6 – Banheiro impresso
Fonte: Weng et al, (2020) - Adaptado

3.3. Aplicação da tecnologia

Ji et al. (2019) apresentam um estudo de uma aplicação desta tecnologia em escala real, da construção de uma subestação de distribuição de energia. Foi utilizada uma estrutura de pórtico, com dois bicos de extrusão que possuíam cilindros de pressurização em substituição aos sistemas vibratórios, que promoveu uma impressão ininterrupta e um concreto mais forte e compacto. A construção em impressão de concreto reduz a

necessidade de trabalho manual, mas pode aumentar o custo de material, devido ao uso de um concreto de classe superior. Esse projeto promove uma experiência para futuras construções em impressão 3D. A Figura 7 mostra o edifício sendo impresso.



Figura 7 - Subestação de distribuição de energia sendo impressa

Fonte: Ji et al, (2019)

Salet et al. (2018) apresentaram uma ponte de bicicleta feita por uma impressora 3D de concreto. Foi a primeira do tipo (modelagem protendida e deposição impressa) em todo o mundo a ser colocada em serviço. Inclui também o uso inovador do reforço de cabos na impressão dos filamentos. O processo de design, impressão e montagem foram discutidos. Um procedimento de teste completo foi seguido para os aspectos estruturais e de construção. Os ensaios de montagem foram realizados para identificar possíveis problemas e perigos. Teste de material, ensaios destrutivos em escala e testes *in situ* foram realizados para mostrar que a ponte está em conformidade com os regulamentos de construção holandeses. A ponte foi aberta em outubro de 2017 e agora faz parte da infraestrutura de ciclismo em torno de Gemert, na Holanda. A Figura 8 mostra a ponte impressa.

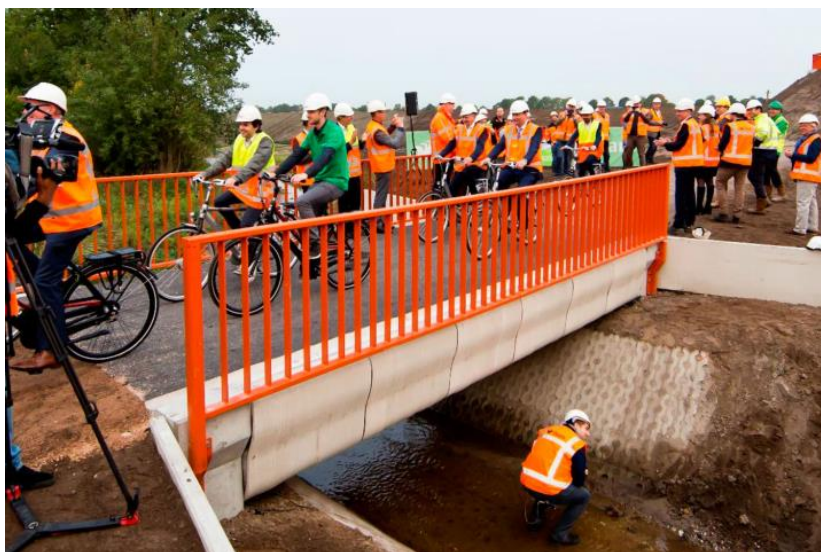


Figura 8 – Ponte de ciclismo na Holanda

Fonte: Salet et al, (2018)

3.4. Vantagens da impressão 3D para construção civil

Ford et al. (2016) listou uma série de vantagens do uso da manufatura aditiva, tais como possibilidade de construir geometrias complexas, redução de custo e tempo, redução de tempo entre o design e a fabricação, redução da geração de lixos e rejeitos, flexibilidade da fabricação *make to order*, melhorar a eficiência dos materiais através da reciclagem, dentre outros.

Masera et al. (2017) comenta das fases do processo de implantação da manufatura aditiva para a construção civil. O primeiro passo foi a difusão de impressoras 3D em escritórios de engenharia e arquitetura, permitindo a realização imediata de modelos de esboço diretamente de arquivo de conceito 3D. Além disso, os softwares BIM e de modelagem de forma livre permitem projetar diretamente em um ambiente tridimensional. Dessa forma, em breve será possível ter continuidade e maior controle sobre todas as fases do projeto, desde a concepção até a produção de componentes do edifício. Isso simplificará a produção industrial de formas complexas não convencionais, permitindo uma crescente personalização de produtos na indústria da construção.

A impressão 3D de concreto definitivamente mostra um alto potencial, mas a melhor maneira de se beneficiar dela ainda precisa ser explorada pela indústria. Os potenciais podem ser classificados em três níveis hierárquicos de tamanho. O maior nível é a impressão 3D *in situ* de edifícios inteiros. Atualmente, as iniciativas nessa direção ainda estão limitadas apenas a moradias de baixo custo, pois a qualidade ainda não pode competir com as estruturas de concreto tradicionais. Além disso, a segurança também ainda é uma questão a ser garantida. O segundo nível pode ser elementos estruturais pré-fabricados, empilhados juntos no local ou componentes únicos impressos em um edifício mais tradicional, como por exemplo fachadas. O nível mais baixo é usar a impressora em combinação com a pré-fabricação tradicional e apenas ajustar os elementos pré-fabricados para torna-los mais personalizados até certo ponto (SALET et al, 2016).

4. Lacunas

A síntese das lacunas é apresentada a seguir:

a) Novas formas de estruturas: apesar da impressão 3D fornecer liberdade geométrica, ela também impõe limitações. A reprodução de um arquivo CAD não pode ser feita independentemente do planejamento do processo. O sistema físico pode limitar a geometria e precisão dos objetos impressos, sendo necessário o planejamento do processo de acordo com o tipo de impressora disponível - pórtico, braço robótico, dentre outras (SALET et al, 2016);

b) Materiais de impressão: a impressão 3D requer especificações de concreto que são diferentes da construção tradicional. Portanto, novos materiais devem ser usados na impressão 3D, devido aos novos requisitos da tecnologia. O material deve ter a consistência certa para ser bombeado através da mangueira e bico de extrusão, não podendo ser muito viscoso, para reduzir o consumo de energia e a dificuldade de extrusão e não podendo ser muito mole, para que as camadas inferiores de concreto suportem o peso das camadas superiores. Além disso, o concreto deve se solidificar rapidamente, devido a velocidade de impressão, para não entrar em colapso e manter sua forma (WU et al, 2016);

c) Legislação sobre o tema: não há regulamentos definidos para o uso da impressão eD na construção civil, sendo difícil usar essa tecnologia de forma a cumprir todos os códigos e leis existentes. Esforços estão sendo feitos para alterar esses regulamentos e incluir a impressão 3D (UPPALLA et al, 2017). As atuais estruturas de construção impressas em

3D são experimentais, como uma caracterização adicional de materiais impressos, esclarecimentos das práticas de construção e processos de impressão, e é requerida uma integração com os atuais regulamentos do código de construção (KREIGER et al, 2015).

d) Integridade estrutural: as peças impressas normalmente são frágeis, enfrentando problemas na impressão de componentes que devem suportar cargas (BERMAN, 2013). Uma estratégia deve ser desenvolvida para impressão de componentes com boa robustez e ductilidade para aplicações estruturais. A estrutura em camadas é provavelmente anisotrópica, podendo formar vazios entre os filamentos, enfraquecendo a capacidade estrutural. A ligação entre os filamentos e camadas, provavelmente influencia as propriedades endurecidas do concreto. Portanto, uma alta resistência à compressão e flexão, bem como ligação de tração, é o principal alvo do desenvolvimento do concreto (BUSWELL et al, 2018).

e) Design: a impressão 3D requer uma mudança na forma de como os arquitetos e engenheiros projetam. Novas geometrias de construção e produtos poderão ser criadas, a um custo menor (PAUL et al, 2018). Além disso, o material utilizado deve ser levado em consideração na concepção do projeto (FENG et al, 2014). A possibilidade da impressão de moradias *in situ* pode exigir uma nova abordagem estrutural para o projeto de construção (HAGER et al, 2016).

f) *Gestão do campo de obras com a impressão 3D: por ser uma tecnologia emergente, é um desafio estimar o custo da construção com precisão. Além disso, o custo inicial da tecnologia é alto (CyBe. Redefining construction by enabling 3D concrete printing by providing hardware, software, material, education, certification and business development. CyBe Construction. <http://www.cybe.eu/>. Acesso 1 Nov 2020).* Outro desafio é que os canteiros de obra não oferecem um ambiente controlado. O transporte, instalação, níveis de acesso, configuração e capacidade de adaptação do equipamento na obra podem dificultar sua implantação (CAMACHO et al, 2018). O uso da impressão 3D na construção requer novas habilidades e técnicas de programação de construção. O novo cronograma de construção deverá incluir a operação e programação da máquina. Além disso, a maioria das atividades de impressão serão contínuas, enquanto as atividades de construção tradicionais são discretas (BOS et al, 2016);

g) Algoritmos para geração de códigos CNC: mais estudos são necessários para otimizar o algoritmo para calcular os caminhos da ferramenta para gerar o código CNC para impressão. Dados de sensores devem ser incorporados, para monitoramento do processo e ajustes em tempo real (SMARSLY et al, 2020). A fim de automatizar o processo de construção, para gerenciamento e otimização, a tradução do modelo digital e sua adequação para o processo de impressão deve ser realizada com intervenção humana mínima;

h) Monitoramento em tempo real: complementando o item anterior, o monitoramento em tempo real é importante para o gerenciamento e controle do processo, bem como incorporar ajustes em tempo real, melhorando a qualidade do processo e do produto impresso;

i) Impressão 3D com múltiplos materiais na construção civil: além do concreto/argamassa, é necessário o desenvolvimento de outros materiais para a impressão 3D para construção civil, a fim de melhorar os parâmetros de resistência da estrutura (BURGER et al, 2020). Um dos materiais que podem ser utilizados no processo é o aço, mas a velocidade de impressão desse elemento deve ser majorada, para que melhore a produtividade do processo (YASSIN et al, 2020);

j) Simulação do processo: à medida que os processos de construção se tornam mais complexos, surge a necessidade de simulação para capturar e analisar o comportamento real do problema em questão. A simulação computacional representa as atividades realizadas em um ambiente específico onde o projeto está sendo construído. Os modelos podem ser usados para otimizar planos, uso de recursos, custos, duração e para melhorar a gestão do projeto (YASSIN et al, 2020).

4. Conclusão

Este trabalho apresenta uma revisão da literatura sobre impressão 3D de concreto. Foi feita uma busca em três bases de dados, Google Acadêmico, IEEE e *Web of Science*, respectivamente. Os artigos selecionados foram categorizados em artigos de revisão bibliográfica, aplicação dos métodos de impressão 3D, comparativo entre construção tradicional e impressão 3D e vantagens. O objetivo deste artigo é apresentar uma visão geral do processo e ao final apontar lacunas, para direcionar futuras pesquisas.

Apesar do grande avanço obtido na impressão 3D em concreto, através da produção de protótipos, pontes, superfícies com geometria complexa, banheiros e até casas, com um bom desempenho, baixo custo e pouca utilização de mão de obra, ainda há muito o que se desenvolver para que essa tecnologia possa ser viável ao setor da construção civil. Ainda há muitos desafios, tais como impressão em grande escala, desenvolvimento de materiais, ausência de regulação, integridade estrutural dos elementos impressos, planejamento de obras, falta de simulação computacional do processo, dentre outros. Assim, os pesquisadores, empresas e profissionais têm muito trabalho a fazer, para que essa tecnologia realmente se torne uma realidade, com todas as vantagens que ela pode fornecer.

Referências

- ANTON, A. et al. *Concrete choreography: pre-fabrication of 3D printed collumns*. Fabricate 2020, 2020. 286-293.
- BERMAN B. *3D printing: the new industrial revolution*. IEEE Eng Manag Rev. 2013.
- BOS F, WOLFS R, AHMED Z, SALET T. *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*. Virtual Phys Prototyp. 2016;11(3):209–25.
- BURGER, J.; LLORET-FRITSCHI, E.; SCOTTO, F.; DEMOULIN, T.; GEBHARD, L.; MATA-FALCON, J.; GRAMAZIO, F.; KOHLER, M.; FLATT, R. *Egshell: Ultra thin three dimensional printed formwork for concrete structures*. 3D Printing and Additive Manufacturing. Volume 7, 2020.
- BUSWELL R.A et al. *3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research*. Cement Concrete Research. 2018;112:37–49.
- CAMACHO, D. D. CLAYTON, P. O'BRIEN, W. J. SEEPERSAD, C. JUENGER, M. FERRON, R. SALAMONE, S. *Applications of additive manufacturing in the construction industry - a forward-looking review*. Automation in Construction., v. 89, p. 110-119, Maio 2018.
- CyBe*. *Redefining construction by enabling 3D concrete printing by providing hardware, software, material, education, certification and business development*. *CyBe Construction*. <http://www.cybe.eu/>. Acesso 1 Nov 2020.
- EL-SAYEGH, S.; ROMDHANE, L.; MANJIKIAN, S. *A critical review of 3D printing in construction: benefits, challenges and risks*. Archives of civil and mechanical engineering, 2020.
- FENG L, YUHONG L. *Study on the status quo and problems of 3D printed buildings in China*. Glob J Hum Soc Sci H Interdiscip. 2014;14(5):7–10
- FORD, S.; DESPEISSE., M. *Additive manufacturing and sustainability: na exploratory study of the advantages and challenges*. Journal of Cleaner Production., v. 137, p. 1573-1587, Novembro 2016.

- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B.** *Additive Manufacturing Technologies*. New York: Springer, 2014.
- HAGER I, GOLONKA A, PUTANOWICZ R.** *3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?* Procedia Eng. 2016;151:292–9.
- IZARD, J.-B. et al.** *Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots*. Construction Robotis., v. 1, p. 69-76, 2017.
- JAGODA, J. et al.** *The viability and simplicity of 3D-printed construction: a military case study*. Infrastructures., v. 5, p. 35, 2020.
- Jl, G. et al.** *A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology*. Materials., v. 12, p. 1540, 2019.
- KREIGER, M. et al.** *The current state of 3d printing for use in construction*. Conference of Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure. Ames: [s.n.]. 2015.
- LABONNOTE, N. RONNQUIST, A. MANUM, B. RUTHER, P.** *Additive Construction: State-of-the-art, challenges and opportunities*. Automation in Construction., v. 72, p. 347-366, 2016.
- MASERA, G. et al.** *Towards a new digital craft. Potential and limitations of 3d printing in architecture and construction*. ISTeA. Re-shaping the construction industry. Maggioli Editore., 2017. 83-92.
- PAUL S, VAN ZIJL G, TAN M, GIBSON I.** *A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects*. Rapid Prototyp J. 2018;24(4):784–98.
- SALET, T. A. M. et al.** *Design of a 3D printed concrete bridge by testing*. Virtual and Physical Prototyping, v. 13, p. 222-236, Maio 2018.
- SALET, T. A. M.; WOLFS, R. J. M.** *Potentials and challenges in 3d concrete printing*. Proceedings of the 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing., 2016. 8-13.
- SMARSLY, K.; PERALTA, P.; LUCKEY, D.; HEINE, S.; LUDWING, H.-M.** *BIM-based concrete printing*. In: *Proc. of the International ICCCB and CIB W78 joint conference on computing in civil and building engineering*, Sao Paulo, Brazil, June. 2020. p. 2020.
- SOUZA, J. P. et al.** *The SPIDERobot: A Cable-Robot System for On-site Construction in Architecture*. Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design., p. 230-239, 2016.
- TEIXEIRA, J. H. S.** *Impressão 3D com extrusão de materiais cimentícios*. Tese de mestrado, 2018.
- UPPALLA S, TADIKAMALLA M.** *A review on 3D printing of concrete—the future of sustainable construction*. I-Manager's J Civ Eng. 2017;7(3):49–62.
- WENG, Y.; LI, M.; RUAN, S.; WONG, T.; TAN, M.; YEONG, K.; QIAN, S.** *Comparative Economic, Environmental and Productivity Assessment of a Concrete Bathroom Unit Fabricated Through 3D Printing and a Precast Approach*. Journal of Cleaner Production, p. 121245, 2020.
- WU P, WANG J, WANG X.** *A critical review of the use of 3D printing in the construction industry*. Automation in Construction. 2016;68:21–31.
- YASSIN, A.; HAMZEH, F.; SAKKA, F.** *Agent based modeling to optimize workflow of robotic steel and concrete 3d printers*. Automation in construction. Volume 110, february, 2020.
- ZHANG, X. et al.** *Large-scale 3D printing by a team of mobile robots*. Automation in Construction., v. 95, p. 98-106, Novembro 2018.