ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

O uso de braços robóticos aplicados à manufatura aditiva em concreto: inovação do design à fabricação

The use of robotic arms applied to additive manufacturing of concrete: innovation from design to fabrication

Ivvy Pedrosa Cavalcante Pessôa Quintella
UFAL | Maceió/AL| Brasil | Ivvy.quintella@ctec.ufal.br
Eduardo Quintella Florêncio
UFAL | Maceió/AL | Brasil | eduardoqf@hotmail.com

Resumo

Neste artigo, objetiva-se introduzir o impacto da utilização de braços robóticos industriais como sistema cinemático aplicado à manufatura aditiva de matérias cimentícios na construção civil, conhecida como 3DCP. Busca-se compreender esse sistema construtivo em suas especificidades e aplicações, bem como ponderar suas vantagens e desvantagens, comparado ao tradicional sistema cinemático de pórticos de três eixos. A análise está estruturada em três aspectos: 1- design; 2- maquinário e formulação; 3- aplicações e inserção mercadológica. O primeiro ponto de análise trata questões como processo de projeto, liberdade do design e multidisciplinaridade. O segundo trata dos aspectos técnicos: ambiente de fabricação, composição e calibração dos equipamentos, dimensão e volume de fabricação, reprodutibilidade, formulação. Finalmente, aborda-se os tipos de aplicações e o seu impacto no mercado da Construção Civil. Constatou-se que o uso de robôs pode contribuir com a inovação e a sustentabilidade do setor, por meio de estratégias eficientes de design e fabricação baseadas em automação.

Palavras-chave: Manufatura aditiva em concreto. Braços robóticos. Impressão 3D.

Abstract

The aim of this article is to introduce the impact of using industrial robotic arms as a kinematic system applied to the additive manufacturing of cementitious materials in construction, known as 3DCP. The aim is to understand this construction system in terms of its specificities and applications, as well as to weigh up its advantages and disadvantages compared to the traditional kinematic system of three-axis gantry cranes. The analysis is structured around three aspects: 1- design; 2- machinery and formulation; 3- applications and market insertion. The first point of analysis deals with issues such as the design process, design freedom and multidisciplinarity. The second deals with technical aspects: manufacturing environment, equipment composition and calibration, manufacturing size and volume, reproducibility, formulation. Finally, the types of applications and their impact on the construction market are discussed. It was found that the use of robots can contribute to innovation and sustainability in the sector through efficient design and manufacturing strategies based on automation.

Keywords: Additive manufacturing of concrete. Robotic arms. 3D printing.

Como citar:
QUINTELLA, I. P. C. P., FLORÊNCIO, E. Q. O uso de braços robóticos aplicados à manufatura aditiva em concreto: inovação do design à fabricação. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

INTRODUÇÃO

Neste artigo, objetiva-se introduzir o impacto da utilização de braços robóticos industriais como sistema cinemático aplicado à manufatura aditiva de matérias cimentícios na construção civil, conhecida como 3DCP (*3D concrete printing*, impressão 3D em concreto) [1]. Busca-se compreender esse sistema construtivo em suas especificidades e aplicações, bem como ponderar suas vantagens e desvantagens, comparado ao tradicional sistema cinemático de pórticos de três eixos.

O processo de manufatura aditiva, também conhecido como impressão 3D, baseia-se em um modelo digital 3D feito em *software* de desenho auxiliado por computador (CAD), que é enviado ao maquinário para a fabricação do objeto a partir da sobreposição de camadas de material. No caso da fabricação 3DCP, os equipamentos mais populares são os sistemas de pórticos, que se assemelham ao sistema de uma impressora 3D de filamento plástico, deslocando-se por coordenadas ao logo dos eixos X, Y e Z. Nos últimos anos, porém, tornou-se cada vez mais difundida a adoção de braços robóticos como sistema cinemático de fabricação em processos 3DCP mais avançados, especialmente os ligados à pré-fabricação de elementos construtivos.

Os braços robóticos são largamente utilizados na indústria de manufatura, a exemplo da automotiva. No entanto, sua utilização na indústria da construção civil ainda é exceção. Enquanto outros setores indústriais já possuem um alto grau de automação, a construção civil ainda envolve grande parte de trabalho artesanal em seus processos. Assim, a adoção desses equipamentos em sistemas construtivos avançados e automatizados, menos dependente de mão de obra manual, pode representar um avanço em direção à digitalização e automatização dessa indústria.

Os robôs são equipamentos fundamentais para a automatização dos processos de produção. Pode-se aplica-los para a execução de tarefas que requerem precisão, consistência e repetibilidade, aumentando a eficiência e a produtividade. Também se pode designá-los para trabalhar em ambientes de risco, aumentando a segurança do trabalho. Outra vantagem é a sua enorme flexibilidade, podendo-se aplicá-los em uma infinidade de funções, bastando reprogramá-los e trocar sua ferramenta de execução. Além disso, os robôs mais modernos também vêm integrando novas tecnologias de colaboração, inteligência artificial e visão de máquina. Com isso, também podem colaborar com outros robôs e humanos, analisar dados da produção em tempo real e corrigir desvios.

A análise da utilização de braços robóticos industriais como sistema de fabricação 3DCP está estruturada em três aspectos: 1- design; 2- maquinário e formulação; 3- aplicações e inserção mercadológica. Assim, o primeiro ponto de análise trata questões como: processo de projeto, liberdade do design e multidisciplinaridade. O segundo ponto trata dos aspectos técnicos: ambiente de fabricação, composição e calibração dos equipamentos, dimensão e volume de fabricação, reprodutibilidade, especificidades das formulações. Finalmente, aborda-se os tipos de aplicações e o seu impacto no mercado da construção civil.

Este estudo buscou levantar o estado da arte da aplicação dos braços robóticos como sistema 3DCP a partir de pesquisa bibliográfica em duas principais fontes: artigos em periódicos, com destaque para *Automation in Construction* e *Cement and Concrete Research*, e nos Anais da conferência bianual *Digital Concrete*. Também foram pesquisados sites de empresas atuantes, tais como Xtree, Vertico e Icon e Cobod. A estruturação em três aspectos objetivou compreender essa tecnologia em sua visão multidisciplinar. Ainda que o foco da pesquisa seja o equipamento, o material e o design impactam diretamente no processo de aplicação dos braços robóticos.

A partir das análises, objetivou-se compreender o impacto da adoção desse tipo de equipamento para a disseminação da tecnologia de manufatura aditiva na construção civil (3DCP). Essa inovação em termos de processo construtivo aproxima a construção civil dos princípios da fabricação baseada em automação, contribuindo para a transformação digital e a sustentabilidade do setor.

DESIGN

A compreensão do processo de design para 3DCP deve partir de uma visão multidisciplinar da construção civil. Essa tecnologia construtiva trabalha na conexão entre os campos da arquitetura, robótica, engenharia estrutural e ciência dos materiais. Assim, o processo de projeto deve consideram a realidade e as limitações envolvidas na fabricação, além de estabelecer um ambiente de criação e produção colaborativa. Desse modo, é crucial que o projetista possua uma profunda compreensão técnica de todas as etapas do processo construtivo, incluindo aspectos relacionados à formulação do material e à operação do equipamento robótico.

As etapas do processo de design envolvem modelagem tridimensional, fatiamento, planejamento do percurso de impressão e simulação. Geralmente, utilizam-se diferentes ambientes de *software* em cada etapa, mas alguns programas oferecem suporte para todas as etapas, do design à fabricação. A modelagem 3D pode ser executada em diversos tipos de softwares CAD paramétricos, incluindo ou não o uso de *plugins* e códigos. Ela é então exportada em um arquivo STL, um formato padrão para impressão 3D. O fatiamento, por sua vez, refere-se ao seccionamento do modelo 3D em camadas 2D imprimíveis.

No caso da 3DCP, o planejamento do caminho da impressão refere-se ao movimento que o robô executa ao mesmo tempo em que o material cimentício está sendo depositado pelo bico extrusor acoplado à extremidade do braço robótico. A maior parte dos sistemas de impressão trabalha com a deposição contínua de material, mas há sistemas mais avançados que permitem interromper e reiniciar a deposição. Em geral, usa-se nessa etapa as linguagens de programação proprietárias de fabricantes dos robôs, tais como KUKA e ABB, que possuem suas próprias linguagens.

Considerando que a área imprimível de um braço robótico é geralmente mais limitada do que a de um sistema de pórtico, muitas vezes se faz necessário o seccionamento da volumetria final em volumes menores. Nesse sentido, antes do fatiamento e definição caminho de impressão, planeja-se a divisão do modelo em partes imprimíveis que

serão posteriormente montadas para a composição da forma final. Assim, diferente da impressão diretamente no canteiro de obras por meio de impressoras de pórtico, pode-se tirar partido da orientação de impressão para a otimização do processo [11]. As peças podem ser impressas em um determinado sentido, rotacionadas e montadas em diferentes direções na composição final da volumetria. Isso pode favorecer a resistência estrutural da peça, dado seu caráter anisotrópico.

Do ponto de vista do design, a compreensão das possibilidades do processo de fabricação digital oferece mais liberdade para o projeto, mantendo a conexão com a tectônica. Um exemplo é a aplicação da otimização topológica [3], que tira partido da possibilidade de fabricação de formas complexas, aumentando a eficiência estrutural ao mesmo tempo que economiza material, tornando o processo mais sustentável.

Figura 1: Impressão 3D de uma viga de concreto protendido, projetada por otimização topológica.



Fonte: Vantyghem et Al.[3].

Porém, apesar de sua promissora possibilidade de complexidade formal, como em outras tecnologias de impressão 3D, ainda há que se levar em contar as suas limitações técnicas. A maior parte das obras construídas em 3DCP com sistema de pórticos não demonstraram grande expressividade formal. Ao contrário, limitavam-se ao que ficou conhecido como “2,5 D”, ou seja, a repetição no eixo Z de contornos bidimensionais. No entanto, recentes avanços a partir da adoção de braços robóticos e na formulação de materiais permitiram uma maior exploração formal e alargaram os parâmetros estéticos na 3DCP, em especial a pré-fabricada [2].

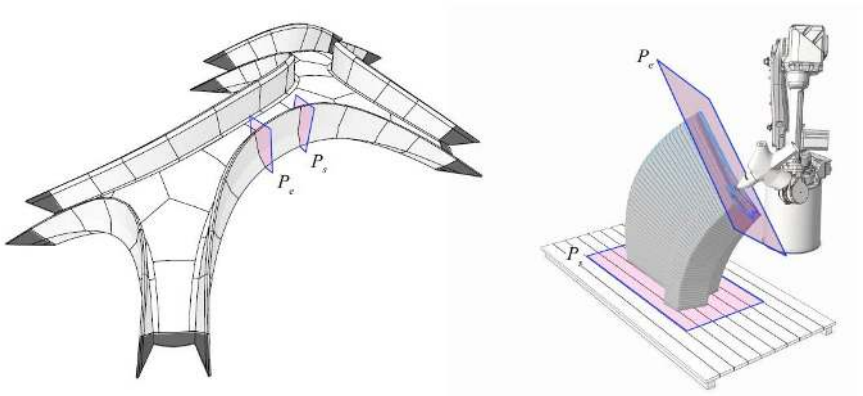
Figura 2: Coluna em 3DCP Concrete Choreography, ETHZ, 2018.



Fonte:https://www.archdaily.com.br/br/921744/eth-zurich-desenvolve-novo-metodo-de-impressao-3d-para-colunas-de-concreto?ad_medium=gallery

Uma das principais estratégias de design para valer-se das liberdades de fabricação proporcionada pelo braço robótico é a deposição não planar. Nela, os caminhos de impressão não são necessariamente lineares, perpendiculares ao plano de impressão. É possível explorar a variação controlada de altura e largura das camadas, por meio do controle da velocidade e da inclinação da ferramenta de deposição no momento do planejamento do percurso de impressão. O efeito alcançado é a exploração de formas orgânicas e superfícies mais suaves. Também se destaca as soluções para suplantar a limitação de formas com inclinações maiores de 45 graus. Outra inovação recente é a integração de cor em alguns processos, possibilitando inclusive efeitos de degradê.

Figura 3: Simulação de deposição não planar para a fabricação da Striatus Bridge, ponte em arco impressa em 3DCP. À esquerda, volumetria final seccionada em blocos de fabricação. À direita, simulação de impressão não planar de um dos blocos.



Fonte: Bhooshan et Al. [11].

Assim, diante das possibilidades estéticas abertas pelo uso dos robôs, os processos de divisão do modelo 3D em partes imprimíveis e o planejamento do percurso de impressão são etapas cruciais para poder valer-se das múltiplas explorações inovadoras de design que estão sendo desenvolvidas atualmente. Isso reforça a necessidade de os designers desenvolverem uma profunda compreensão do processo de fabricação para possibilitar a inovação estética valendo-se desse sistema construtivo. Atualmente, no entanto, tal formação raramente é disseminada nos currículos acadêmicos, devendo os profissionais buscarem capacitação complementar.

MAQUINÁRIO E FORMULAÇÃO

MAQUINÁRIO

O sistema de pórticos foi o primeiro equipamento cinemático a ser utilizado aplicado ao 3DCP, desde a pioneira proposta Contour Crafting, do Prof. Behrokh Khoshnevis da Universidade do Sul da Califórnia [1]. Atualmente, esse sistema segue sendo o tipo mais utilizado na tecnologia 3DCP, especialmente para a impressão de construções diretamente no canteiro. Uma das vantagens é a sua capacidade construtiva: é possível produzir grandes volumes de construção de forma rápida, eficiente e econômica.

A movimentação cinemática dos sistemas de pórticos assemelha-se a uma impressora 3D de filamento polimérico do tipo FDM, deslocando-se nos eixos x, y e z. A movimentação no eixo x pode ser feita por meio de trilhos instalados no canteiro ou por uma estrutura modular componente do próprio sistema cinemático. Uma desvantagem é a necessidade de preparação e instalação do equipamento no canteiro.

Figura 4: Impressora de pórtico Bod 2, da Cobod, a maior fornecedora mundial de sistemas de pórticos para 3DCP.

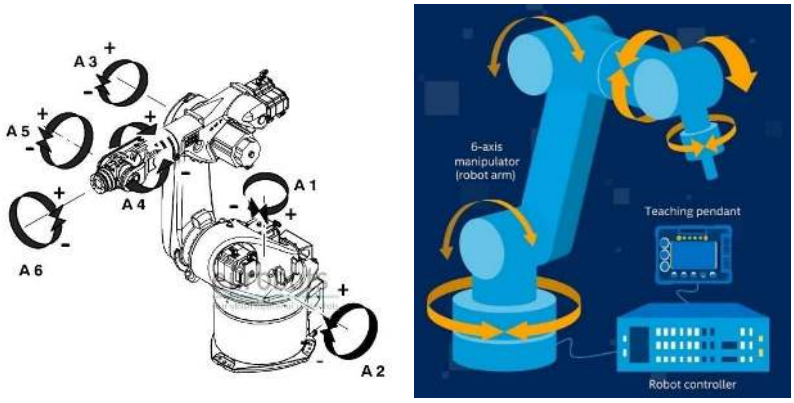


Fonte: COBOD [5].

Um braço robótico, por sua vez, é um tipo de robô cujo manipulador assemelha-se a um braço humano. Ele possui articulações que lhe permitem a execução graus de movimentos. Assim, quanto mais juntas de articulação, mais graus de liberdade de movimento (*Degree of Freedom*, ou DoF) ele possuirá.

Em 3DCP, geralmente utilizam-se braços robóticos com seis graus de liberdade (6 DoF), significando que ele pode girar em seis direções distintas, possuindo assim uma liberdade de fabricação significativamente maior do que o sistema de pórtico, que possui em geral apenas três eixos. Assim, ele possibilita maior versatilidade e complexidade formal às partes fabricadas. O robô é composto de manipulador (braço), o controlador, a *Teach Pendant Unit* (TPU ou unidade de programação e operação portátil) e a ferramenta (*end effector*), além de atuadores, sensores, sistemas de visão, sistemas de energia e componentes de *software*.

Figura 5: À esquerda, esquema de um braço robótico com seis eixos (DoF). À direita, os componentes de um robô: o manipulador (braço robótico), o controlador e o TCP.



Fonte: KUKA e https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/robotics/robotic-arm.html

O braço robótico deve ser montado sobre uma base, que vai lhe assegurar estabilidade para movimentar-se. Essa base também pode estar integrada a trilhos ou se configurar como uma plataforma móvel. Com essas estratégias, pode-se aumentar seus graus de liberdade e ampliar a área e o volume de fabricação.

Uma das principais vantagens do uso de robôs é em relação à qualidade da produção: a precisão de movimentos, a repetibilidade, o monitoramento da produção em tempo real por meio de *scanners* e a possibilidade de correção de desvios. Todos esses aspectos geram peças com acabamento superior. Além disso, a maior parte dos sistemas que empregam braços robóticos atuam em ambientes controlados, baseados na pré-fabricação *off-site*. O ambiente controlado oferece grandes vantagens em relação ao controle de qualidade da impressão, ainda que a logística possa ser um ponto negativo a ser considerado.

Figura 6: Braço robótico com seis eixos montado sobre trilho em ambiente controlado, imprimindo um componente construtivo em 3DCP.



Fonte: https://cobod.com/robotic-arm-vs-gantry-3d-concrete-printer/

FORMULAÇÃO

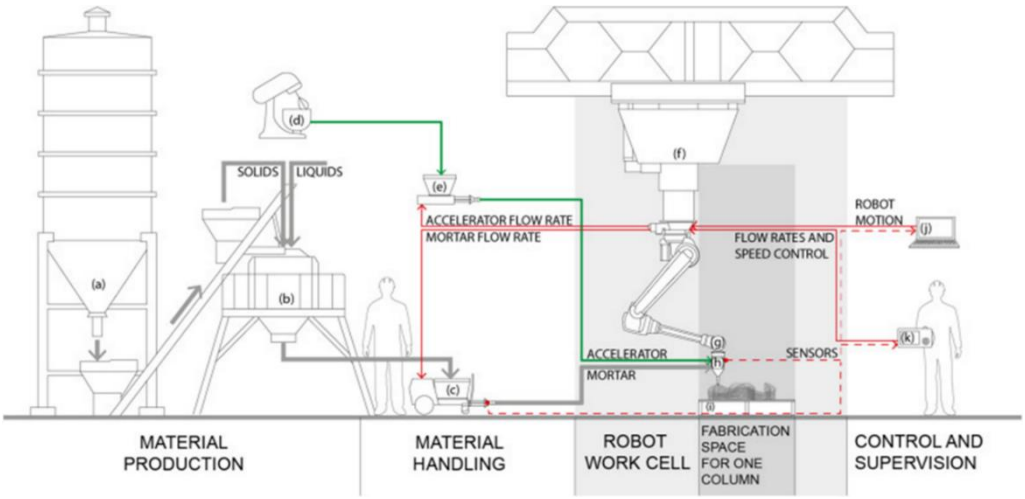
Do ponto de vista da manipulação dos materiais, as principais etapas do processo de fabricação compreendem: a) dosagem dos materiais, seja formulações próprias ou misturas prontas para 3DCP fornecidas por fabricantes; b) preparação da mistura por adição de água, em lotes ou por mistura contínua; c) bombeamento; d) extrusão do material, por meio de bico extrusor acoplado ao robô.

Em termos de sistemas de composição dos materiais, as duas principais abordagens atuais são conhecidas como sistemas de um componente (1K) e de dois componentes (2K) [6]. Os sistemas monocomponentes são ainda hoje os mais utilizados

mundialmente e baseiam-se em uma formulação de maior densidade e com tensão de escoamento capaz de garantir sua construtibilidade durante a sobreposição das camadas. Os sistemas de pórticos, em sua maioria, utilizam essa abordagem.

Já os sistemas bicomponentes são adotados preferencialmente em sistemas de braços robóticos. Eles se baseiam no uso de um material mais fluido e fácil de bombear, alguns com adição de retardantes. Esse material será misturado a acelerantes, em um cabeçote misturador próximo à saída do bico extrusor, logo antes da deposição do material. Esses sistemas permitem a execução formas mais complexas, contribuindo para a liberdade formal dos componentes fabricados. Outra característica que implica na qualidade estética da peça impressa é a altura da camada de deposição, que nesse sistema pode ser mais fina, minimizando o efeito visual das camadas e melhorando o acabamento superficial.

Figura 7: Esquema demostrando os componentes de um sistema de fabricação 3DCP com o uso de braço robótico para a impressão de colunas, conforme mostrado na figura 2.



Fonte: ANTON et al. [2].

APLICAÇÕES E INSERÇÃO MERCADOLÓGICA

Vários tipos de projetos 3DCP vêm sendo beneficiados com essa tecnologia, dada a flexibilidade inerente ao uso de robôs na indústria. Diferentemente dos sistemas de pórticos, que possuem sua aplicação destinada em sua maioria a construções no canteiro de obras, as aplicações dos sistemas de braços robóticos podem ser construções, elementos construtivos, pontes, infraestrutura, mobiliário urbano, design de interiores, etc. Isso denota a grande flexibilidade da tecnologia, que pode ser adaptada para um grande número de situações.

Apesar das vantagens inerentes à flexibilidade e precisão da fabricação, entre outras, as desvantagens relativas à menor área de impressão e à logística necessária para transporte e montagem das peças faz com que muitas vezes a solução preferencial para as edificações seja as que adotam os sistemas de pórticos. Em termos de número de edificações efetivamente construídas e dotadas de certificação, os sistemas de pórticos ainda se encontram largamente à frente dos robôs [5]. Isso não significa que

não é possível usar braços robóticos para a pré-fabricação de partes da edificação a serem montadas. Já há exemplos bem-sucedidos que adotaram essa técnica.

Tabela 1: Comparação Entre os Principais Sistemas Cinemáticos

Características	Sistema de pórticos	Braços robóticos
Ambiente de Fabricação	On-site Instalação no canteiro	Off-site/ On site Calibração do espaço imprimível
Maquinário e formulação	Movimentação em 3 ou 4 eixos/ Sistema 1K	Movimentação em 6 ou mais eixos/ Sistema 2K
Aplicações e inserção mercadológica	Edificações inteiras Exs.: Cobod, Icon	Elementos arquitetônicos ou partes de edificações Exs.: Xtree, Vertico

Fonte: o autor.

Atualmente, ainda não há um consenso geral sobre como a 3DCP irá se desenvolver do ponto de vista das aplicações da construção civil [10], se prevalecerá braços robóticos com fabricação *off site* ou sistemas de pórticos montados diretamente no canteiro; ou ambos, porém segmentados em aplicações específicas. Uma das soluções intermediárias que vêm sendo testadas para tentar solucionar a área de impressão limitada é a adoção de braços robóticos montados sobre trilhos no canteiro de obras.

CONCLUSÕES

Constatou-se que o uso de robôs aplicados à manufatura aditiva em concreto pode contribuir com a indústria da construção civil por meio da adoção de processos automatizados. Dada as vantagens inerentes a esse tipo de equipamento, poder-se promover maior precisão, repetibilidade e qualidade na produção dos elementos construtivos, promovendo um avanço em termos de inovação e sustentabilidade.

Do ponto de vista do design, os braços robóticos aumentaram a capacidade dos sistemas 3DCP de fabricar formas complexas, com otimização topológica e de melhor acabamento. Quanto ao sistema de manipulação de materiais, o sistema 2k proporcionou um maior controle da impressão. Novas possibilidades formais se abriram, a partir da aplicação de técnicas como a impressão não planar, a variação de altura e largura de camadas, as inclinações maiores de 45 graus, entre outras.

Todavia, para valer-se desses princípios, torna-se necessária uma compreensão multidisciplinar e uma visão holística do processo de fabricação. Assim, faz-se necessário investir na capacitação de profissionais, integrando os princípios da construção digital e da 3DCP desde a formação acadêmica.

Do ponto de vista da aplicação e inserção mercadológica, a 3DCP tem conhecido um crescimento exponencial e sua tecnologia tem se aprimorado consideravelmente. Houve uma rápida expansão de mercado e um amadurecimento tecnológico contínuo nos últimos anos, constatado pelo número de obras construídas e novas empresas atuantes, bem como o número de centros de pesquisas debruçados sobre o tema. Diante desse quadro, a perspectiva de crescimento para a próxima década mostra-se promissora.

A adoção dos braços robóticos certamente contribuiu para essas conquistas. Porém, será preciso observar o impacto da popularização dos robôs nos sistemas 3DCP nos próximos anos, para concluir se eles virão a se tornar os sistemas cinemáticos preferenciais dessa tecnologia, ou se os sistemas de pórticos ainda prevalecerão. É provável que sejam também desenvolvidos equipamentos robóticos mistos, visando combinar vantagens inerentes aos dois sistemas.

A partir dos avanços alcançados pela adoção dos braços robóticos, a tecnologia de manufatura aditiva na construção civil (3DCP) vem contribuindo pra a inovação e a sustentabilidade do setor por meio da transformação digital.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Alagoas, pelo apoio à realização de Pós-doutorado, e à CAPES, pelo apoio à realização de Doutorado sanduíche no exterior (bolsa PDSE), ambos na Loughborough University (Inglaterra), uma das instituições pioneiras em impressão 3D em concreto.

REFERÊNCIAS

[1] BUSWELL, R.A. LEAL DE SILVA, W.R. JONES, S.Z. DIRRENBERGER, J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. Cem. Concr. Res., Vol. 112 (2018), pp. 37-49, Article 10.1016.

[2] ANTON, A. et all. A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns Automat Constr. (2021)

[3] VANTYGHEM, G. DE CORTE, W. SHAKOUR, E. AMIR O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by optimization Autom. Constr., 112 (2020).

[4] MA, G. R. BUSWELL, W.R. LEAL DA SILVA, L. WANG, J. XU, S.Z. JONES. Technology readiness: a global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. Cem. Concr. Res., 156 (2022), Article 106774.

[5] COBOD INTERNATIONAL, Annual Report 2022. In: https://cobod.com/annual-report-2022/

[6] WANGLER, T. Digital Concrete processing: a review. 1st International Conference on 3D Construction Printing (3DcP 2018), Melbourne, Australia, November 25-28, 2018.

[7] BUSWELL, BLANCO, CAVALARO, KINNELL (ORGS). Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022, RILEM BOOKSERIES, Springer 2022.

[8] COBOD INTERNATIONAL, WHAT ARE THE DIFFERENCES BETWEEN ROBOTIC ARM AND GANTRY 3D CONCRETE PRINTER? Blog, 2023. In: https://cobod.com/robotic-arm-vs-gantry-3d-concrete-printer/

[9] WANGLER, T. Digital Concrete processing: a review. 1st International Conference on 3D Construction Printing (3DcP 2018), Melbourne, Australia, November 25-28, 2018.

[10] LAUBIER, R WUNDER, M WITTHÖFT, S ROTHBALLER C. Will 3D Printing Remodel the Construction Industry? JANUARY 23, 2018. Boston Consulting Group. In: https://www.bcg.com/publications/2018/will-3d-printing-remodel-construction-industry

[11] BHOOSHAN, S. V. BHOOSHAN, A. DELL'ENDICE, J. CHU, P. SINGER, J. MEGENS, T. MELE, P. BLOCK. The striatus bridge: computational design and robotic fabrication of an unreinforced, 3d-concrete-printed, masonry arch bridge. Architecture, Structures and Construction, 2 (4) (2022), pp. 521-543.