

Impressão 3D: como essa tecnologia vem impactando atualmente a construção civil?

IVVY PEDROSA CAVALCANTE PESSÔA QUINTELLA – PROF^A. DR^A. – <https://orcid.org/0000-0002-6279-0250> (ivvy.quintella@ctec.ufal.br) ;
EDUARDO QUINTELLA FLORÊNCIO – Msc. | CENTRO DE TECNOLOGIA – CTEC/UFAL

RESUMO

NO PRESENTE ARTIGO, OBJETIVA-SE INTRODUIR ASPECTOS TÉCNICOS DA IMPRESSÃO 3D COM MATERIAIS CIMENTÍCIOS APLICADA À CONSTRUÇÃO CIVIL, APRESENTANDO TENDÊNCIAS GLOBAIS E DISCUTINDO EM QUE MEDIDA ELA VEM IMPACTANDO ESSA INDÚSTRIA. SERÃO DISCUTIDAS ALGUMAS DAS PRINCIPAIS VANTAGENS DA MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE CONCRETO, COMO A ELIMINAÇÃO DA NECESSIDADE DO USO DE FÔRMAS, RESPONSÁVEIS POR GRANDE PARTE DO TEMPO E DO CUSTO ASSOCIADO À CONSTRUÇÃO EM CONCRETO. POR OUTRO LADO, SERÃO APRESENTADAS ALGUMAS DAS LIMITAÇÕES DESSA TECNOLOGIA EM SEU ESTÁGIO ATUAL, RELATIVAS À SUA CAPACIDADE CONSTRUTIVA, ÀS PROPRIEDADES DO MATERIAL E AO SISTEMA ESTRUTURAL, ENTRE OUTROS. APESAR DAS DIFICULDADES TÉCNICAS E DA FALTA DE LEGISLAÇÃO, APRESENTA-SE TENDÊNCIAS GLOBAIS DO MERCADO, DENOTANDO CLARO CRESCIMENTO. FINALMENTE, CONSTATA-SE QUE, APESAR DOS FEITOS ATÉ O MOMENTO, A IMPRESSÃO 3D UTILIZANDO CONCRETO AINDA NÃO SE CONSOLIDOU COMO UMA TECNOLOGIA COMPETITIVA E AMPLAMENTE UTILIZADA COMO FERRAMENTA IMPORTANTE NA CONSTRUÇÃO TRADICIONAL E

NO AMBIENTE DE PRÉ-FABRICAÇÃO. PORÉM, DADA A SUA RÁPIDA EXPANSÃO DE MERCADO E AMADURECIMENTO TECNOLÓGICO CONTÍNUO NOS ÚLTIMOS ANOS, A PERSPECTIVA DE CRESCIMENTO PARA A PRÓXIMA DÉCADA É PROMISSORA. NESSE SENTIDO, VISLUMBRA-SE A CONSOLIDAÇÃO DA 3DCP COMO UMA DAS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS A SEREM ADOTADAS NA BUSCA DE UMA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO AUTOMATIZADA, PRODUTIVA, EFICIENTE E AMBIENTALMENTE SUSTENTÁVEL.

PALAVRAS-CHAVE: IMPRESSÃO 3D, CONCRETO, CONSTRUÇÃO CIVIL, TECNOLOGIA.

1. INTRODUÇÃO

Há pouco mais de uma década, o entusiasmo midiático em torno da impressão 3D prometia mudanças revolucionárias na produção de edificações, alardeando-a como uma tecnologia disruptiva que iria substituir os métodos construtivos tradicionais. Agora, suplantado o arroubo inicial, pode-se avaliar seu amadurecimento tecnológico, compreendendo suas vantagens e limitações. No presente artigo, objetiva-se apresentar aspectos técnicos da impressão 3D com materiais cimentícios aplicada à construção civil, apresentando tendências globais e discutindo em que medida ela vem impactando o mundo da construção civil.

O processo de impressão 3D, ou manufatura aditiva (MA), é feito geralmente a partir de um desenho digital

CAD, que é transformado em um código geométrico e enviado para o maquinário que realiza a fabricação tridimensional do objeto, sobrepondo camada por camada de material. No âmbito da construção civil, existem diversas tecnologias de MA, que utilizam diferentes materiais, tais como polímeros, metais e concreto. Dentre elas, a mais popular e amplamente adotada é a que opera por bombeamento e extrusão de materiais cimentícios, conhecida como 3DCP (*3D concrete printing*, impressão 3D em concreto) [1], que funciona de modo semelhante ao de uma impressora de extrusão de filamento polimérico (FDM), porém sem o uso de aquecimento.

As etapas do processo de fabricação incluem:

- 1 – o design, envolvendo modelagem, fatiamento, planejamento do percurso de impressão e simulação;
- 2 – a dosagem dos materiais, podendo ser usada formulações próprias ou misturas prontas para 3DCP de fabricantes de argamassas;
- 3 – a ativação da matriz cimentícia em misturadores pela adição de água, que pode ser produzida em lotes ou por meio de misturadores contínuos;
- 4 – o transporte do material, feito geralmente por meio de bombas de cavidade progressiva;
- 5 – a extrusão do material, por meio de cabeçote de impressão com bico extrusor acoplado ao manipulador cinético. Algumas operações incluem uma etapa de pós-processamento antes da cura.

Atualmente, existem duas principais abordagens em 3DCP, conhecidas como sistemas de um componente (1K) e de dois componentes (2K) [3]. Os sistemas

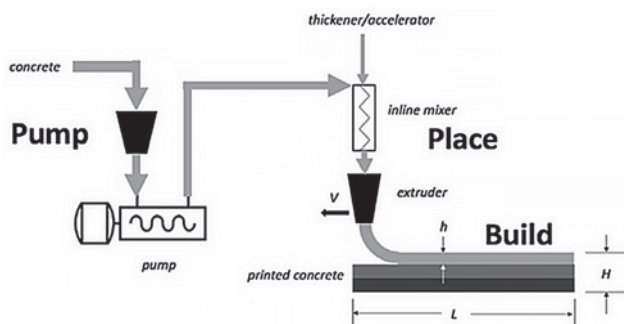


FIGURA 1

ESQUEMA DE UM SISTEMA 2K DE BOMBEAMENTO E EXTRUSÃO DE CONCRETO MOSTRANDO ALGUMAS DAS PRINCIPAIS ETAPAS DE PROCESSAMENTO

FONTE: WANGLER *et al.*, 2018. [2]

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 bicomponentes, de uso mais recente, baseiam-se no uso de um material mais fluido e fácil de bombear, alguns com adição de retardantes [3]. Ele será posteriormente misturado a acelerantes, em um cabeçote misturador próximo à saída do bico extrusor, logo antes da deposição do material (Figura 1). A maior parte dos sistemas trabalham com deposição de fluxo contínuo, mas há alguns exemplos de sistemas que interrompem e reiniciam a deposição de material, como é comum na impressão 3D FDM.

A MA pode ocorrer tanto “on-site”, diretamente no canteiro de obras, como “off-site”, em um ambiente de fabricação controlado. A construção *on-site* geralmente utiliza como maquinário um sistema de pórtico com abordagem 1K, que permite a extrusão de material deslocando-se nos eixos X Y Z. A movimentação cinemática nesse tipo de equipamento é semelhante à de uma impressora 3D *desktop*, constituindo-se como uma solução econômica e largamente adotada em 3DCP. Esse sistema possui a vantagem de eliminar a necessidade de logística das peças produzidas, possibilitando construir em dimensões maiores e em maior volume. Porém, a sua produtividade pode ser afetada pelas intempéries e pelo tempo de montagem do equipamento no local.

A fabricação 3DCP *off-site*, por sua vez, vale-se do princípio da pré-fabricação, produzindo partes que serão posteriormente montadas no canteiro. Em geral, utiliza-se braços robóticos industriais (Figura 2). Esse tipo de equipamento destaca-se por seus seis ou mais eixos, proporcionando maior versatilidade e possibilitando maior complexidade formal às partes. Geralmente utilizam o sistema 2K e uma menor altura das camadas impressas, inclusive podendo valer-se da deposição não planar e da variação controlada de altura e largura das camadas. Por outro lado, há desvantagens como uma menor área de produção alcançada e a necessidade de transporte e montagem das peças no canteiro, podendo encarecer e

tornar o processo mais complexo em algumas situações devido à logística.

Atualmente, há empresas e *startups* do setor apostando em ambas as linhas, bem como em novas interações, tais como: o uso de robôs no canteiro de obras. Porém, há uma certa tendência ao direcionamento de serviços. Empresas que adotam o sistema *on-site*/pórtico focam na construção de edificações no canteiro de obras e as que adotam o sistema *off-site*/braços robóticos geralmente se especializam na produção de partes especiais a serem montadas. As empresas que mais possuem obras efetivamente construídas e certificadas são as do primeiro tipo.

2. VANTAGENS DA ADOÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Uma das principais vantagens da manufatura por extrusão de concreto é a eliminação da necessidade do uso de fôrmas, responsáveis por grande parte do tempo e do custo associado à construção em concreto. Visto que o material é depositado apenas onde é necessário, reduz-se, em princípio, o desperdício de matéria-prima. As aberturas para a integração de esquadrias e instalações já podem ser previstas em projeto e seus vazios integrados ao processo construtivo. Outra possibilidade é a integração de diversas funções aos elementos construídos, como isolamento térmico e acústico.

Essa tecnologia abre caminho para a adoção de uma maior liberdade formal no projeto e para a personalização em massa, sem que isso gere grande impacto no custo de fabricação final. Outra vantagem é possibilidade de adoção da otimização topológica, em que o design promove a aplicação de material apenas onde ele é estruturalmente demandado pelos esforços. Isso pode reduzir significativamente a quantidade de material na fabricação de um elemento construtivo, contribuindo também para a sustentabilidade ambiental.

A 3DCP pode contribuir para aumentar a sustentabilidade e reduzir o impacto ambiental do setor da construção civil por meio de estratégias mais eficientes de design e fabricação baseadas em automação. Ela também vem buscando soluções para promover a redução de material necessário



FIGURA 2
IMPRESSÃO 3D DE COLUNA UTILIZANDO BRAÇO ROBÓTICO INDUSTRIAL, EM PESQUISA LIDERADA PELO PROF. RICHARD BUSWELL, UM DOS PIONEIROS DESSE CAMPO, NA UNIVERSIDADE DE LOUGHBOROUGH, INGLATERRA
FONTE: AUTORES

e de resíduos gerados, reduzindo também os custos de produção. Atualmente, há empresas tentando desenvolver processos que empreguem a MA em todos os componentes da construção, desde a fundação até a cobertura, o que pode colaborar ainda mais para potencializar seus benefícios.

Assim, a adoção de processos automatizados, como a 3DCP, pode contribuir para uma maior eficiência e rapidez construtiva, e, consequentemente, para o barateamento de custos com mão de obra, sem perder de vista a qualidade e a durabilidade do produto fabricado. Ressalve-se, porém, que aqui desconsideram-se processos iniciais de implantação da tecnologia (aquisição, treinamento, formulação, calibração...). Uma vez implantada, há relatos de empresas da área de efetivo alcance de maior rapidez em obras produzidas, com mão de obra reduzida, comparada à construção tradicional em concreto.

3. LIMITAÇÕES TÉCNICAS DA IMPRESSÃO 3D

Apesar de a liberação do uso de fôrmas se mostrar como um importante quesito em termos de produtividade e otimização de recursos, a falta de regulação específica para estruturas fabricadas com essa tecnologia cria a necessidade de uso de elementos estruturais feitos com concreto convencional. Assim, muitos dos exemplares conhecidos e efetivamente construídos são em realidade cascas impressas em 3D utilizadas como fôrmas permanentes. Ou seja, o concreto armado convencional é adotado em pilares estruturais no interior das paredes impressas, que funcionam como elemento de fechamento.

Recentes estudos situaram a 3DCP como *technology readiness* (TRL — nível de prontidão tecnológica) entre 6 e 7 [5]. Isso denota que, enquanto tecnologia, ela ainda se encontra evoluindo e possui várias questões a resolver para integrar-se plenamente ao mercado da construção civil. Por exemplo:

- a) Quanto à sua capacidade construtiva: em geral, ela é utilizada apenas para construir paredes e elementos construtivos, e não a construção inteira. Ainda há a necessidade de mão de obra e de tecnologias tradicionais para a produção de todo o restante da edificação, que deve ser contabilizada no tempo total de construção.
- b) Quanto ao material: apesar de se referir como impressão 3D em concreto, geralmente trata-se do uso de um micro concreto, devido à limitação de integração de agregados graúdos para o bombeamento e extrusão na maior parte dos equipamentos. Embora já comecem a aparecer alguns exemplos de equipamentos que suplantam essa limitação, permitindo o uso de agregados graúdos, eles ainda são exceção. O material cimentício precisa ser suficientemente fluido para ser bombeado, porém, uma vez depositado, ele precisa estruturar-se rapidamente para manter a forma e suportar o peso das camadas seguintes. Isso envolve uma maior complexidade no desenvolvimento de formulações especiais com vários aditivos.
- c) Quanto à confiabilidade do processo de fabricação: a anisotropia característica da 3DCP impacta diretamente em

sua resistência mecânica. As falhas no processo de produção podem levar a problemas como descolamento de camadas, descontinuidades do filamento e aparecimento de fissuras por retração do concreto.

- d) Quanto ao sistema estrutural: ainda não há uma metodologia amplamente aceita sobre como integrar reforço estrutural à essa tecnologia. Em muitos casos, a armação é integrada de modo tradicional e as paredes impressas são utilizadas como elementos de fechamento. Há também o uso de protensão, um pós-tensionamento com o emprego de cabos de aço, geralmente utilizado na união de peças modulares. Essas são maneiras encontradas para adaptar-se às legislações estruturais dos edifícios tradicionais.
- e) Quanto à sustentabilidade ambiental: apesar da otimização do uso de material, a pegada de carbono das formulações usadas em 3DCP em geral é maior devido ao uso de uma maior quantidade de cimento, o que vem sendo sanado em parte pela integração de aditivos substituindo parte do cimento e pelo uso de materiais reciclados.

4. TENDÊNCIAS GLOBAIS

Constata-se atualmente um crescimento em termos de quantidade de edifícios produzidos. De acordo com um relatório divulgado pela Cobod [6], em 2022 havia 130 edifícios feitos com essa tecnologia ao redor do mundo, 55 dos quais foram construídos nesse mesmo ano, denotando uma rápida recuperação pós-pandemia. Esse número pequeno de edificações totais, porém, evidencia que ainda há mais expectativa em torno da tecnologia do que resultados e impacto global em larga escala no setor da construção.

Porém, esses números tendem a aumentar rapidamente. No Oriente Médio, a Fundação Dubai Future prevê que a impressão 3D na construção reduzirá o trabalho de construção humana em 70% e cortará custos em 90%. Recentemente, Dubai anunciou que pretende ter 25% dos novos edifícios construídos com a tecnologia de impressão 3D até 2030. É interessante que haja iniciativas e apoio dos governos nessa adoção, criando um ambiente favorável ao seu desenvolvimento. É o caso do Reino Unido, que estabeleceu uma Estratégia Nacional para Manufatura Aditiva. Nela, estima-se que a construção em 3DCP poderia contribuir com mais de US\$1 bilhão para o PIB anual do país e criar 15.000 oportunidades de empregos até 2025.

Atualmente, a maior parte das atenções talvez esteja voltada para a possibilidade dessa tecnologia ajudar a solucionar dois problemas: a crise mundial da habitação e a construção rápida em áreas que sofreram com desastres naturais ou guerras. Algumas pesquisas apontaram que a 3DCP poderia reduzir o tempo de construção em um quarto, em comparação com os métodos convencionais [7]. Diversos artigos em mídia recente indagaram se a impressão 3D poderia ajudar a resolver a crise imobiliária nos EUA. A empresa americana Icon está produzindo atualmente Wolf Ranch,



FIGURA 3

WOLF RANCH, UM CONDOMÍNIO DE 100 CASAS IMPRESSAS EM 3D NO TEXAS, EM PARCERIA COM A CONSTRUTORA LENNAR E O ESCRITÓRIO DE ARQUITETURA BIG. CONSTRUÇÃO DA EMPRESA ICON 3D, COM MAQUINÁRIO PRÓPRIO (VULCAN)

FONTE: <https://www.dezeen.com/2022/11/11/icon-big-wolf-ranch-3d-printed-homes-austin/>

um condomínio de 100 casas impressas em 3D no Texas, em parceria com a construtora Lennar e o escritório de arquitetura BIG (Figura 3). Recentemente, a empresa dinamarquesa Cobod, a maior fornecedora mundial de sistemas de pórticos com bombeamento e extrusão para impressão 3D, enviou maquinário para a construção de uma escola na Ucrânia como parte de uma ação humanitária.

Outra tendência fundamental é a pesquisa e desenvolvimento de materiais menos poluentes. O concreto é o material de construção mais utilizado no mundo, sendo, todavia, um dos maiores responsáveis pela emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. A indústria global do concreto, por meio da entidade Global Cement and Concrete Association (GCCA), anunciou no ano de 2020 a meta de atingir a neutralidade de carbono até 2050. Muitas pesquisas em 3DCP focam em diminuir a pegada de carbono do concreto, buscando desenvolver materiais alternativos, incorporar materiais locais, materiais reciclados, materiais que absorvem carbono, entre outras estratégias.

Apesar do destaque dado pela mídia ao longo dos anos, permanece certa resistência do mercado em relação à confiabilidade e à atratividade visual do produto final. Isso se deve também à falta de legislação específica que garanta sua qualidade e durabilidade, que ainda não passou pela prova do tempo. Muitas edificações construídas receberam os avals necessários para proceder a construção, porém tais leis podem valer apenas localmente, como o Decreto No. (24) de 2021 do Emirado de Dubai [8]. Atualmente, há diversos esforços em relação ao desenvolvimento de legislações e certificações a serem amplamente adotadas. Em 2020, a empresa Peri conseguiu obter aprovação para a construção da primeira casa impressa em 3D na Alemanha, a partir do desenvolvimento de testes complementares e adaptados, tais como propriedades do material, resistência e durabilidade, entre outros (Figura 4).

Para além da legislação, as limitações em relação à escala de impressão 3D também parecem vir sendo suplantadas. Em 2022, a China anunciou a construção de um projeto de grande escala, a Usina Hidrelétrica da Barragem de Yangqu, usando

robôs controlados por Inteligência Artificial e impressão 3D. Ela possui 180 metros de altura e está prevista para ser concluída até 2024, sendo atualmente a maior obra a utilizar essa tecnologia.

Na Europa, América do Norte e Ásia, a 3DCP encontra-se em plena expansão [6,7], com diversos projetos de destaque tanto em edificações como em infraestrutura, integrando a maior parte dos edifícios construídos (Figura 6), bem como construtoras atuantes nessa tecnologia. Nota-se também o grande crescimento de grupos de pesquisa científica, centros de inovação e de publicações dedicadas ao tema, além de eventos de divulgação científica na área. Destaca-se, em especial, a RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication (Digital Concrete) [9], que em 2024 promove sua quarta edição.

Na América Latina, no entanto, a 3DCP ainda se encontra em fase experimental e de alcance limitado [7], com iniciativas isoladas e com apenas cinco edificações contabilizadas até 2022 (Figura 5). No Brasil, mapeou-se algumas iniciativas pontuais, como a *startup* 4Constru, que integrou as *startups* Inova House, 3D Home Construction (que construiu a primeira casa impressa do Brasil) e



FIGURA 4

A PRIMEIRA CASA IMPRESSA EM 3D DA ALEMANHA, COM DOIS PAVIMENTOS E UMA ÁREA DE CERCA DE 160 m² (2020). CONSTRUÇÃO DO GRUPO PERI, COM MAQUINÁRIO COBOD BOD 2

FONTE: <https://cobod.com/explore-designs-and-interiors-of-3d-printed-houses/>

Domus 3D. Destaca-se também os avanços alcançados pelo Projeto HubIC 3D, ligado ao HubIC (Hub de Inovação e Construção Digital), fruto de um Convênio de Cooperação Técnica entre a USP e a ABCP, junto com o SNCI.

5. CONCLUSÕES

A Indústria da Construção Civil vem enfrentando a necessidade urgente de

3D PRINTED BUILDINGS BY LOCATION

130 BUILDINGS

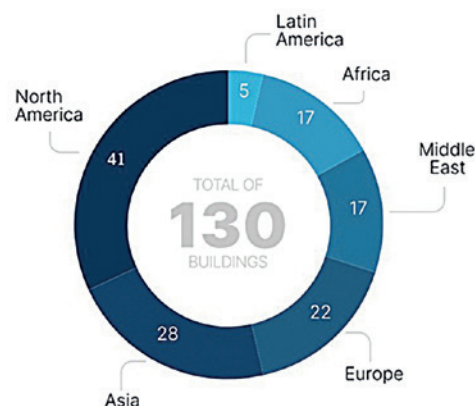


FIGURA 5

DISTRIBUIÇÃO DE EDIFICAÇÕES EM 3DCP POR LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA CONTINENTAL

FONTE: <https://cobod.com/global-inventory-3d-printed-buildings/>

melhorar sua produtividade e eficiência, ainda muito inferior em comparação a outros setores da indústria da manufatura [10]. Enquanto outras indústrias já possuem alto grau de automação e avançam na adoção de sistemas *ciber* físicos ligados à Indústria 4.0, a construção civil ainda envolve grande parte de trabalho artesanal em seus processos.

Porém, esse quadro tende a mudar. A mão de obra cada vez mais escassa pressiona a adoção de soluções mais eficientes, lastreadas pelo extenso processo de digitalização do setor no momento atual, proporcionado pela adoção do BIM e pela integração de outras tecnologias digitais como *Digital Twins*, IOT, *Big Data*, entre outras. Para além dos avanços na tecnologia da informação e na gestão, é crucial que a transformação digital agregue também os processos construtivos avançados e automatizados, menos dependentes da mão de obra manual. Nesse sentido, a 3DCP é uma das tecnologias que podem contribuir para o avanço na digitalização e integração de todo o processo construtivo, desde o projeto até a fabricação, promovendo melhorias nos índices de eficiência e produtividade e reduzindo a incorrência de erros de interpretação e retrabalho.

Atualmente, no entanto, constata-se que ainda poucas inovações construtivas

foram efetivamente incorporadas pelo setor de construção, devido a questões como falta de legislação específica, necessidade de investimento e até mesmo a resistência em adotar novas soluções tecnológicas. Isso é agravado em setores especialmente resistentes a mudanças, como é o caso da Indústria da Construção Civil [11].

A adoção de novas tecnologias implica a necessidade de investir em automação e mão de obra especializada, representando um alto custo inicial de investimento em equipamento e treinamento. Pesa também o fato de que, apesar do amadurecimento tecnológico nos últimos anos, a 3DCP ainda precisa enfrentar certas limitações relativas à sua capacidade construtiva, às propriedades do material de impressão, ao sistema estrutural, à falta de legislação específica, entre outras. Isso impacta na confiabilidade do processo como um todo e em sua capacidade competitiva de mercado. Assim, ainda não há um consenso se ela poderá suplantear tais barreiras e alcançar a escalabilidade necessária para impactar a indústria.

Ademais, essa tecnologia envolve diretamente áreas como arquitetura, robótica, engenharia estrutural, ciência dos materiais, e a necessidade de interação entre todas essas disciplinas é crucial para seu sucesso. Assim, faz-se necessário investir na capacitação de profissio-

nais a partir de uma visão multidisciplinar da construção, integrando os princípios da construção digital e da 3DCP desde a formação acadêmica, o que ainda não é realidade consolidada na maior parte dos currículos disciplinares.

Em resumo, constata-se que, apesar dos feitos até o momento, a impressão 3D utilizando concreto ainda não se consolidou como uma tecnologia competitiva e amplamente utilizada como ferramenta importante na construção tradicional e no ambiente de pré-fabricação. Porém, dada a sua rápida expansão de mercado e amadurecimento tecnológico contínuo nos últimos anos, a perspectiva de crescimento para a próxima década é promissora. Nesse sentido, vislumbra-se a consolidação da 3DCP como uma das principais tecnologias a serem adotadas na busca de uma Indústria da Construção automatizada, produtiva, eficiente e ambientalmente sustentável.

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 BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BUSWELL, R.A. LEAL DE SILVA, W.R. JONES, S.Z. DIRRENBARGER, J. 3D printing using concrete extrusion: a roadmap for research. *Cem. Concr. Res.*, Vol. 112 (2018), pp. 37-49, Article 10.1016.
- [2] WANGLER, T. DIGITAL CONCRETE PROCESSING: A REVIEW. 1ST INTERNATIONAL CONFERENCE ON 3D CONSTRUCTION PRINTING (3DCP 2018), MELBOURNE, AUSTRALIA, NOVEMBER 25-28, 2018..
- [3] WANGLER, T., PILEGGI, R., GUREL, S., FLATT, R. J.; A chemical process engineering look at digital concrete processes: Critical step design, inline mixing, and scaleup," *Cement and Concrete Research*, vol. 155, p. 106782, May 2022..
- [4] VANTYGHM, G. DE CORTE, W. SHAKOUR, E. AMIR O. 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization *Autom. Constr.*, 112 (2020).
- [5] 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.
- [6] COBOD INTERNATIONAL, Annual Report 2022. In: <https://cobod.com/annual-report-2022/>
- [7] ROBAYO-SALAZAR, R. MEJÍA DE GUTIÉRREZ, M. A. VILLAQUIRÁN-CAICEDO, S. DELVASTO ARJONA. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*, vol. 146, Feb. 2023.
- [8] EMIRATE OF DUBAI. Decree No. (24) of 2021 Regulating the Use of Three-dimensional Printing in Construction Works in the Emirate of Dubai. 2021.
- [9] BUSWELL, BLANCO, CAVALARO, KINNELL (ORGS). Third RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication: Digital Concrete 2022, RILEM BOOKSERIES, Springer 2022.
- [10] MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity. February 2017. In: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution/pt-BR>
- [11] 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>