XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Considerações sobre a manufatura rápida aditiva e o uso de novos tipos de concreto nas construções impressas

Rapid additive manufacturing considerations and the use of new types of concrete in printed constructions

Leonardo Geraldo de Oliveira Gomes
UFMG | Belo Horizonte | Brasil | leo.design.ufmg@gmail.com
Sofia Araújo Lima Bessa
UFMG | Belo Horizonte | Brasil | sofiabessa@ufmg.br
Andréa Franco Pereira
UFMG | Belo Horizonte | Brasil | andreafranco@taskmail.com.br

Resumo

A manufatura aditiva rápida (RAM) surgiu como uma evolução, na década de 1980, que mudou completamente o cenário da prototipagem. Este trabalho teve como objetivo realizar uma pesquisa descritiva sobre o impacto da adoção dessas novas tecnologias digitais diante das possíveis vantagens relacionadas ao menor impacto ambiental das construções. Foi possível observar que o uso da RAM é um conceito novo em ambientes construídos e está se tornando uma realidade efetiva com o uso de formas arrojadas, precisão de fabricação com vazios funcionais e eficiência construtiva dinâmica desde o projeto, o que não seria possível com processos de construção tradicionais.

Palavras-chave: Impressão 3D. Prototipagem. Fabricação aditiva. Concreto.

Abstract

Rapid additive manufacturing emerged as an evolution of the development of rapid prototyping technologies that, since the 1980s, have completely changed the scenario of prototyping. This work aims to carry out descriptive research on the impact of adopting these new digital technologies against the requirements and possible advantages related to new materials and a lower environmental impact for buildings. Additive manufacturing in concrete is a new concept in building environments and is becoming an effective reality every day, making practical processes marked by freedom of design with the use of complex physical shapes, manufacturing precision with functional voids, dynamic efficiency of construction from design, which is not possible with conventional construction processes.

GOMES, L. G. de O. .; BESSA, S. A. L.; PEREIRA, A. F. Considerações sobre a manufatura rápida aditiva e o uso de novos tipos de concreto nas construções impressas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022. p. 1–13. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2204

Keywords: 3D printing. Prototyping. Additive manufacturing. Concrete.

INTRODUÇÃO

Atualmente, não são mais produzidas soluções para os problemas do cotidiano como eram feitas até a segunda metade do Século XX. As tecnologias digitais disponibilizadas representam as principais causas dessa mudança que afeta toda a extensão da sociedade, desde aqueles que identificam e definem as soluções dos problemas, aqueles que fabricam e constroem até aqueles que utilizam.

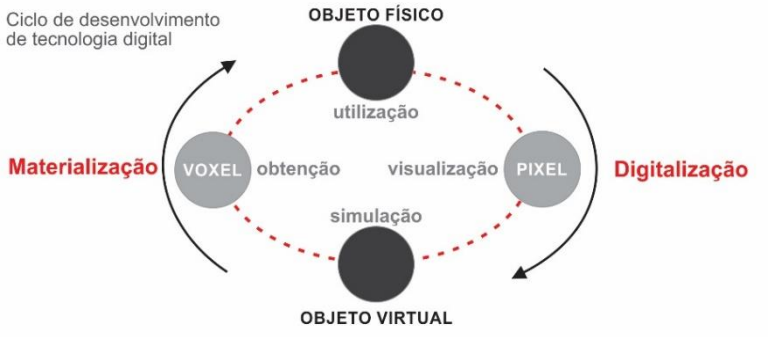
Inúmeros são os fatores que evidenciam um caminho sem retorno para a adoção destas tecnologias digitais na prática de projetos e na construção dos ambientes, sendo que três destacam: a) evolução das tecnologias de auxílio ao desenvolvimento de projetos, b) preocupação com o menor impacto ambiental, e c) pesquisas científicas associadas a novos materiais.

Em um contexto histórico recente, fica visível a existência de um ciclo de desenvolvimento de tecnologias digitais relacionadas aos processos de projeto e produção/construção, começando pela disponibilidade dos sistemas CAD, nos anos 1980, e terminando com a disponibilização dos sistemas de construção por manufatura aditiva, nos anos 2000. Integração de cálculos de projeto, desenhos tridimensionais virtuais, simulações dinâmicas e processos de fabricação/construção diretas de modelos virtuais são processos deste ciclo e representam parte da evolução dos processos baseados em digitalização pela qual passa toda a sociedade. Segundo Lévy (1996) [1], a digitalização e a codificação atuam como um princípio de interface que se torna método de simplificação que traduz todo o conhecimento existente em uma massa eletrônica, de comunicação integrada e em tempo real.

CICLO DE DIGITALIZAÇÃO

Esse ciclo teve início com o desenvolvimento de tecnologias que viabilizaram a visualização dos objetos pelas representações digitais, que segundo Alam *et al.* (2019) [2], são baseadas em grades quadradas unitárias cujas células são chamadas de ***pixels***, quando representam em 2D e ***voxels*** quando representam em 3D (Fig. 01). As imagens digitais, segundo Bachamann (2016) [3], são chamadas de imagens *raster* ou *bitmap* e são compostas pelos *pixels*. Já os *voxels* representam os volumes digitais do mundo por meio de unidades de arranjos tridimensionais, que segundo Vantyghem et al. (2021) [4], são o equivalente tridimensional do *pixel* bidimensional.

Figura 01 – Ciclo de desenvolvimento da tecnologia digital



Fonte: os autores.

A simulação aparece na sequência desse desenvolvimento. Banks (1999) [5] a define metodologia aplicada que descreve o comportamento de um sistema usando modelos matemáticos, ou seja, é a imitação da operação de processo ou sistema do mundo real, sendo usada quando o sistema real não pode ser acionado, acessado, pode ser perigoso, inaceitável ou simplesmente não existe.

Passa-se então, à obtenção do modelo físico representativo do modelo virtual a partir da abstração da construção dos objetos no mundo. Primeiramente se aborda processos de retiradas de materiais (*Subtractives Processes* SP), caracterizados pela fabricação orientada por CAM (*Computer Aided Manucfaturing*) e CNC (*Computer Numeric Control*). A seguir os processos de adição de materiais (*Additive Process* - AP) são desenvolvidos pelas tecnologias de prototipagem rápida e impressões 3D.

Bryden (2014) [6] define como conjunto de processos em que peças tridimensionais são construídas usando materiais específicos a partir de modelos CAD virtuais.

Torna-se relevante citar que o fechamento deste ciclo de desenvolvimento não representa o fim de uma classe de tecnologia. Na verdade, provocou o início de outros novos ciclos de evolução tecnológica, sendo que um desses está diretamente relacionado ao desenvolvimento de novos materiais, gerando uma onda de possibilidades de fabricação e construção direta e utilização imediata de modelos impressos. Segundo Gibson et al. (2010) [7] isso acontece como consequência da evolução das pesquisas sobre os materiais de impressão. Materiais sintéticos e metálicos, com propriedades físicas similares aos normalmente utilizados propiciaram a construção de peças utilizáveis direto dos desenhos virtuais dos projetos auxiliados por computador, criando a tecnologia de manufatura aditiva ou *Additive Manufacture* (AM). A este estudo interessa a abordagem sobre a *Additive Manufacture for Construction*, (AMfC) voltada para a impressão de ambientes. A tecnologia AMfc é, segundo Liou (2019) [8] e Karmani et al. (2010) [9], definitiva como a representante desta nova fase do desenvolvimento tecnológico.

Também interessa as novas abordagens sobre o concreto como material importante e de necessidade futura inevitável, o definindo assim como material preferencial de análise para esta nova tecnologia. Portanto, apresenta-se o atual estado de desenvolvimento e aplicação da tecnologia de manufatura aditiva, representada pelas impressões 3D de grandes volumes e sua relação direta (ou indireta) com o uso do

concreto, destacando a inovação ocorrida neste material com vistas a gerar menor impacto ambiental. A partir da análise do ciclo de evolução da tecnologia AMfC serão apresentadas as principais variantes em uso e pesquisa, juntamente com os atuais processos de novos arranjos propostos para o concreto, como as substituições de componentes e o uso de materiais cimentícios suplementares.

O uso destas tecnologias exigiu fortes mudanças de comportamento nos arquitetos, engenheiros, designers, bem como para toda cadeia de desenvolvimento, fabricação e construção. Portanto, também será abordado o novo cenário de atuação destes atores.

TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA

Prototipagem e manufatura rápida

No desenvolvimento das tecnologias digitais a impressão 3D define o retorno à forma física de todo processo de digitalização desenvolvimento nos projetos. A Prototipagem Rápida – *Rapid Prototype Technology* (RTP) é a primeira tecnologia efetiva desse processo de materialização, funcionando a partir do fatiamento do modelo tridimensional de um produto virtual, permitindo a atuação nos três eixos referenciais (herança dos sistemas CAD) em um processo de deposição sequenciada (camada por camada) de um material específico cujo resultado será um sólido físico correspondente a forma digital original.

Em alguns processos, a deposição é feita com um material de reação para pó, fibras plásticas ou polímeros em fusão. Em outros somente movimentando uma luz (Laser ou UV) solidificando um líquido reativo. Mas em todos os casos trata-se da primeira abordagem para uma tecnologia digital que só poderia ser aplicada com uma relação direta e dependente da evolução dos materiais de adição. Todos os processos de RPT desenvolvidos estão diretamente relacionados aos seus materiais específicos.

A RPT surgiu como uma das mais importantes tecnologias disruptivas do Século XX. Inúmeros autores são consensos quanto ao seu impacto, possibilidades e desdobramentos nos processos de fabricação e construção. Porém, para Gibson et al. (2010) [7], aferir que a tecnologia só é útil para fazer modelos seria impreciso e subestimaria a tecnologia. Após três décadas de desenvolvimento, as aplicações do RPT vão muito além da construção de protótipos. Narayan (2019) [10] afirma por exemplo, que a tecnologia está penetrando em todos os setores com materiais cada vez mais aplicáveis, inclusive na indústria de biofabricação, processando biomateriais para a demanda de tecidos e órgãos humanos para transplantes.

A Tabela 01 apresenta um resumo destas tecnologias:

Tabela 01 – Quadro resumo dos tipos de tecnologia de RPT

Tecnologia	Material e reação	Desenvolvedor	Ano
Stereolithography Apparantus (SLA)	Resina foto curável + UV	3D Systems	1987
Fused Deposition Modeling (FDM)	Fio de polímero + calor	Stratasys	1988
Selective Laser Sintering (SLS)	Termoplástico + fusão a Laser	3D Systems	1994
Jetting Systems	Resina líquida foto curável + UV	3D Systems	1996
Three-Dimensional Printing (3DP)	Pó de polímero + aglutinante líquido	ZCorp	1997
Selective Mask Sintering (SMS)	Polímero foto reativo + Laser	Sintemak	2000
Direct Light Processing (DLP)	Polímero foto reativo + luz branca + UV	Envision Tech	2003
Direct Metal Laser Sintering (DLMS)	Polímero e/ou pó de metal + Laser	SLM Solutions	2004
Fused Metal Sintering (FMD)	Pó de metal + Laser	Optomec	2005

Fonte: referências bibliográficas: organizado pelos autores.

Para Bryden (2014) [6], a Prototipagem Rápida e a Manufatura Aditiva libertaram os projetistas de restrições de fabricação tradicionais, permitindo que projetem qualquer forma concebível para a fabricação de produtos específicos, exclusivos ou pontuais. Liou (2019) [8], completa afirmando que uma vez que a Manufatura Aditiva não requer ferramentas, ela pode produzir diretamente os produtos, sendo ela mesma a ferramenta de fabricação rápida, permitindo produzir pequenos lotes, como faz atualmente a indústria aeroespacial. E isso sem a utilização de nenhuma máquina-ferramenta ou processo especial, muito mais ágil que nos processos tradicionais.

Construção rápida

As *Additive Manufacturing for Construction* (AMfC) representam a migração de toda a evolução da tecnologia de prototipagem e fabricação rápidas para a construção dos ambientes, trazendo como características principais o tamanho da área de impressão e uso de novos materiais. São duas as principais categorias de impressão 3D relacionadas à construção civil:

a) *Liquid Deposition Modeling* (LDM) ou deposição de material pastoso. Tecnologia de extrusão de material, que utiliza uma gama de materiais com diversas viscosidades, variando de líquidos mais viscosos, como colágenos e espumas expansivas, até materiais menos viscosos como o concreto e a argila.

b) *Selective Activation Modeling* (SAM) ou modelagem por ativação seletiva. Tecnologia baseada na impressão 3D sobre camadas de partículas (*Particle Bed 3D Printing*), trabalhando com a deposição de material seco em camadas finas estabilizados por agentes ativadores aglutinantes. É mais utilizada para fabricação de partes da construção, podendo também trabalhar com material cimentício.

A Tabela 02 apresenta um resumo da evolução destas tecnologias:

Tabela 02 – Quadro resumo dos tipos de tecnologia de AMfC

Tecnologia	Tipo	Desenvolvedor	Ano
Contour Craft	LDM – in situ	Behronk Koshevis	2001
Freeform Concrete Printing	LDM – in situ, impressão inteira + suportes	Loughborough Univ.	2003
D-Shape	LDM + SAM – in situ, impressão inteira	Enrico Dini	2005
WATG	LDM + SAM – in situ, suporte montados por robô e impressão posterior	USA	2010
WinSun 3D Printed Building System	LDM – in situ	WinSun	2013
Doubled Curve Concrete	LDM – off grid, impressão prévia e montagem in situ	4TU.Bouw	2016
Total Kuston	LDM – off grid ou in situ	Andrey Rudenko	2016
Digital Building Techmology (DBT)	SAM – in situ	ETH Zurich	2017
SMART LAB	Híbrido – off grid, CNC, inserção suportes, montagem in situ e impressão posterior	ETH Zurich	2018

Fonte: referências bibliográficas: organizado pelos autores.

Em análise sobre as vantagens da *Additive Manufacturing for Construction* a partir de publicações recentes (Demiyanov, 2019 [11], Vantyghem, 2021 [4], Bryden, 2021 [6], Lim, 2012 [12], Zang et al., 2019 [13], Um, 2018 [14] e Florêncio, 2017 [15]) identifica-se que com o uso da tecnologia obtém-se: i) a redução significativa do custo de mão de obra, posto que operadores humanos são necessários apenas para monitoramento; ii) otimização da instalação e manutenção de equipamentos; iii) redução significativa dos resíduos de construção; iv) possibilidade de utilizar concreto de novas composições e suplementos; v) possibilidade de se reutilizar resíduos de construção como parte da mistura; e vi) liberdade arquitetônica e otimização de especificações de performances (físicas e geométricas) das construções em função de projeto paramétrico e generativo.

Soma-se a isso uma menor emissão de CO_2 (na obtenção e uso de novos concretos), otimização da demanda com materiais de construção, redução de distancias e volume de transporte na relação fornecedor-obra e aumento da eficiência energética em todo o processo.

CONCRETO EM SUA NOVA ABORDAGEM

O cimento é o maior produto manufaturado em massa em todo planeta e é a segunda substância mais utilizada no mundo depois da água (SCRIVENER et al., 2018) [16]. Para este artigo a escolha do concreto como material de análise no uso em *Additive Manufacturing for Construction* vem do reconhecimento de uma sempre crescente demanda de consumo que representa a quase totalidade da produção mundial de ambientes construídos. É certo que com o crescimento da população e suas relações diretas com urbanização e industrialização, a demanda por concreto continuará aumentando dia a dia.

A produção anual atual está por volta de 10 bilhões de toneladas e, de acordo com Aprianti et al. (2014) [17], seguindo a atual taxa de crescimento da população mundial, estima-se que até 2050, um aumento para aproximadamente 18 bilhões de toneladas

anuais. E ainda é importante citar a grande quantidade de resíduos de material baseado em cimento que é gerado pelo mundo anualmente. Apesar da disponibilidade de tecnologia, aplicações e muita pesquisa focadas na reutilização e reciclagem dos RCC, grande parte desta produção ainda vai para o ambiente (WANG et al., 2019) [18]

De acordo com Scrivener *et al.* (2018) [16], existem duas principais abordagens baseadas em novos materiais que podem oferecer reduções adicionais substanciais em suas emissões globais de CO_2 nos próximos 20-30 anos: i) aumento do uso de suplementos de baixo CO_2 como substitutos parciais do clínquer de cimento Portland; e ii) uso mais eficiente do clínquer do cimento Portland em argamassas e concretos.

Para Papadakis *et al.* (2002) [19], o desenvolvimento sustentável das indústrias de cimento e construção como um todo, poderia ser alcançado através da maximização do uso dos materiais cimentícios suplementares (SCM) e das novas configurações na composição dos concretos. Utilizar resíduos de fabricação e de construção representa importante fator de mitigação de impactos ambientais. Utilizar tais resíduos como materiais de substituição, reposição ou agregados na produção do concreto amplia de sobremaneira a importância desta prática, principalmente no tocante à diminuição da emissão de CO_2 associadas à obtenção do cimento e do concreto. Alguns autores (Scrivenera et al., 2018 [16], Letelier et al. (2020) [20], Silva et al. (2020) [21], Gunasekar et al. (2019) [22], e Cheng et al. (2016) [23]), alinham-se nas conclusões de seus estudos sobre a viabilidade de utilização dos resíduos industriais e de construção como materiais de substituição (RM). E inúmeros estudos sobre seleção, preparação e otimização de concretos para uso em AMfC estão disponíveis, como os trabalhos de Khan, 2020 [24], Chung et al. (2021) [25], Krishiaraja et al. (2020) [26], Mohammad et al. (2021) [27], Zhang et al. (2017) [28], Hamback et al. (2017) [29].

Segundo Florêncio et al. (2017) [15], para a utilização efetiva da impressão de concreto (3DCP), não existe uma mistura única que permita sua deposição por extrusão controlada numa superfície, entretanto existe uma boa lista de parâmetros específicos relativos à escala, ambiente, suporte e estratégias de montagem que deve ser observada. Lim et al. (2012) [12] chamam a atenção para características reológicas e de resistência que também devem ser consideradas.

Entretanto as principais características citadas por Florêncio et al. (2017) [15] (2017) [30] e, Duballet et al. (2017) [31], para a construção por impressão de concreto são: i) bombeabilidade: possibilidade do concreto mover-se pelo sistema de impressão 3D; ii) extrudabilidade – capacidade do concreto ser forçado através de um bico em um fluxo contínuo; iii) tempo de cura controlado – capacidade do material manter as propriedades acima descritas dentro de uma margem de tolerância, após a qual o concreto endurece; e iv) edificabilidade – definida pela resistência apresentada pela camada de concreto recém-depositada de suportar a carga da outra camada sem sofrer significativas deformações.

Inúmeras pesquisas são realizadas com testes de diferentes variações do concreto de cimento Portland convencional, variando-se a mistura ou agregando aditivos em busca de determinadas características reológicas ou outras características desejáveis ao uso em impressão 3D (Zhang et al., 2019) [13].

Como resultado, indicações de boas práticas vão surgindo, como por exemplo, que se utilize materiais locais na composição do concreto para 3DCP, principalmente os SCM e RM, a recomendação de utilização de materiais funcionais, tal como os autocuráveis (capaz de selar e curar as rachaduras) ou concretos otimizados com propriedades de captura de CO_2. Essas pesquisas demonstram que os novos concretos, com SCM ou RM, apresentam potencial de uso nas edificações construídas por AMfC.

ECOSSISTEMA DO USO DA MANUFATURA ADITIVA PARA CONSTRUÇÃO

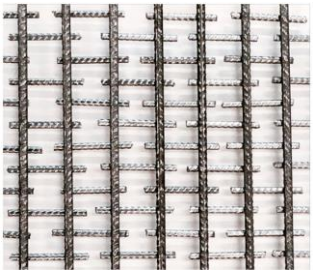
A definição de ecossistema de *Additive Manufacturing for Construction* mostra-se como proposição adequada para o futuro da tecnologia, alinhando perfeitamente com Dini et al. (2018) [32], por se tratar de um ecossistema digital representando um sistema sociotécnico aberto, adaptável e distribuído, que pode se auto-organizar, crescer em escala e atingir pretensos índices de sustentabilidade necessários. Também se adequa pela constatação do impacto causado em cadeia produtiva do ambiente construído, do projeto a até os negócios de obras.

Mas significativa mudança disruptiva surge para os atores desse ecossistema. Segundo Asprone et al. (2018) [33], o desenvolvimento em design e modelagem digital, manufatura aditiva, robótica, bem como na engenharia de cimentos e de materiais, permitiram a introdução de novos métodos de construção. Entretanto, mudanças de comportamentos são exigidas aos projetistas e construtores no tocante ao uso destas inovações, que compartilham as características: a) colocação de material robotizado, b) falta de sistemas de cofragem convencionais, c) alto grau de liberdade para criação de formas, d) introdução de novas funcionalidades, e) possibilidade da fabricação sob medida (ASPRONE et al., 2018) [33], f) nova abordagem quanto ao cálculo estrutural.

A abordagem deste ecossistema é denominada Fabricação Digital de Concreto - *Digital Fabrication with Concrete (DFC)* e define a atuação de forma sistêmica para a solução de problemas para construções impressas, principalmente no tocante à estrutura. O DFC surge como disciplina nova que integra ao projeto arquitetônico a possibilidade de se criar soluções integradas de reforços estruturais para as impressões de ambientes. O importante para este trabalho é reconhecer que um novo conceito de projetos e cálculos estruturais precisará incorporar a abordagem integral para novos desenvolvimentos, materiais e processo de aplicação. Isso demonstra a amplitude de atuação da AMfC.

Figura 3: DFC: exemplo de implementação de projeto desenvolvido em DFC.





Aplicação Mesh Mould Technology e exemplo de configuração de reforço

Fonte: ASPRONE et al. [33], adaptado pelos autores.

Novas formas de classificação para a *Additive Manufacturing for Construction* também foram desenvolvidas. Duballet et al. (2017) [31] comenta que parece importante distinguir o "processo de impressão" do "sistema de construção". Para um determinado processo de impressão podem existir vários sistemas de construção. Segundo os autores, o processo de impressão denota o conjunto de dispositivos (robô, bomba etc.) necessários para moldar o material, enquanto o sistema de construção refere-se a todo o método de construção, desde a definição da matéria-prima, dos reforços até à construção final. A distinção das cadeias de projeto, materiais e construção é notada, mas a interdependência delas também se evidencia. Duballet et al. (2017) [31] relatam que antes os processos eram investigados principalmente em termos de robótica, reologia e mecânica dos materiais. Agora o problema de implementação real já é abordado e demonstra a necessidade da total integração de todas as classes envolvidas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a construção, a manufatura aditiva é a mais disruptiva tecnologia desenvolvida nos últimos anos e apresenta fortes indícios de se tornar uma das mais importantes descontinuidades do cenário da construção de habitação, indústria e ambientes no mundo. Sua utilização impacta de sobremaneira toda a cadeia produtiva deste setor, das mudanças da forma de se projetar a até o negócio dos arranjos dos canteiros de obras, bem como, dos desenvolvedores de tecnologia de impressão, novos negócios de recicladores a até o chão de fábrica. É uma tecnologia que propõe processos disruptivos de atuação, marcados pela liberdade de design sem mão-de-obra, uso de formas físicas complexas, precisão da fabricação com vazios funcionais, eficiência dinâmica da construção desde o projeto, ou seja, coisas que não eram possíveis de se obter com processos convencionais de construção.

Entretanto, todo esse desenvolvimento trouxe exigências de mudanças de comportamento para arquitetos, engenheiros, designers e toda a cadeia de desenvolvimento/fabricação/construção, bem como adaptações que passam pela exigência de uso de materiais, equipamento e mão-de-obra específicos, agravados

pelo alto custo das instalações de impressão, pela diminuição do número de empregos, por algumas limitações para construção de superfícies que não forem genuinamente verticais, pela falta de códigos, padronizações, métodos e práticas de projetos etc.

Mas no caso da *Additive Manufacturing for Construction* pode-se arbitrar que o seu atual estado e papel são relevantes na transição de dois processos no tocante à produção de ambientes construídos: a) o atual, disruptivo, no qual toda a sociedade percebe que mudanças na forma de se produzir ambientes estão acontecendo e b) um cenário próximo futuro, de descontinuidade, no qual após as adaptações necessárias, a AMfC poderá cumprir o papel na recuperação da estabilidade das construções de ambiente e práticas de negócios, focados no menor impacto de forma realmente sistêmica.

É o fato de permitir o uso de novos concretos, produzidos com novos materiais e agregados ou com um aumento do fator de reciclagem de resíduos, processos que por objetivo buscam um menor impacto ambiental, que amplia a aceitação de uso da manufatura aditiva para construção. Isso por conta da possível intervenção do fluxo natural de descarte destes resíduos no ambiente, bem como na otimização dos processos de produção do cimento e do concreto, visando uma diminuição potencial da emissão de CO_2, causados pela sua obtenção.

A grande ressalva fica por conta da real necessidade da criação de novas disciplinas integradas e de novas práticas de desenvolvimento a para atuação efetiva dos arquitetos, engenheiros e designers nos novos projetos baseados em *Additive Manufacturing for Construction*.

REFERÊNCIAS

[1] LÉVY, Pierre. O Que é Virtual? Rio de Janeiro: Editora 34, 1996.

[2] ALAM, Jawaherul; BLASIUS, Thomas; RUTTER, Ignaz; UECKERDT, Torsten and WOLFF, Alexander. Graph Drawing and Network Visualization - chap. **Contact Representations** (pgs. 472-486), 27th International Symposium, Praga, 2019

[3] BACHMANN, Talis. **Perception of Pixelated Images.** Academic Press is an imprint of Elsevier, London, 2016.

[4] VANTYGHEM, Gieljan; OOMS, Ticho e DE CORTE, Wouter. VoxelPrint - A Grasshopper plug-in for voxel-based numerical simulation of concrete printing. **Automation in Construction Journal,** Elsevier, 2021.

[5] BANKS, Jerry. Introduction to simulation. In Winter Simulation Conference, Proceedings..., Atlanta, USA, 1999.

[6] BRYDEN, Douglas. **CAD and Rapid Prototyping Product Design**. Laurence King Publishing Ltd, London, 2014.

[7] GIBSON, I., ROSEN, D. W., STUCKER, B. **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. Springer, New York. ISBN: 978-1-4419-1119-3, 2010.

[8] LIOU, Fuewen Frank. **Rapid Prototyping and Engineering Applications: A Toolbox for Prototype Development**. CRC Taylor & Francis Group, New York, 2019.

[9] KARMANI, Ali K. e NASR, Emad Abouel. Engineering Design and Rapid Prototyping, Springer New York Dordrecht Heidelberg London, 2010 - ISBN 978-0-387-95862-0, e-ISBN 978-0-387-95863-7 e DOI 10.1007/978-0-387-95863-7.

[10] NARAYAN, Roger. **Rapid Prototyping of Biomaterials Techniques in Additive Manufacturing**, Second Edition - Woodhead Publishing, Elsevier - United Kingdom, 2019.

[11] DEMYANOV, Alexey; POPOV, Ilya. Overview of global design experience and a design of a mobile construction 3D printer. **Architecture and Engineering,** Volume 4 Issue 4. Pages 22-29. DOI: 10.23968/2500-0055-2019-4-4-22-29.

[12] LIM, S.; Buswell, R. A.; Le, T. T.; Austin, S. A.; Gibb, A. G. F.; Thorpe, T. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. **Automation in Construction**. n.21, p. 262-268, 2012.

[13] ZHANG, Jingchuan, WANG, Jialiang, DONG, Sufen, YU, Xun, HAN, Baoguo. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,** Volume 125, October 2019.

[14] UM, Dugan. **Solid Modeling and Applications - Rapid Prototyping, CAD and CAE Theory**, Springer International Publishing. AG, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74594-7.

[15] FLORÊNCIO, Eduardo; MARQUES, Lêda; CORSO, Nádia; LIMA, Thiago; UCHÔA, Sílvia - Concreto para uso em Impressora 3D e sua utilização na construção de edificações: um estudo prospectivo. **Caderno Prospectivo,** v.10, n.3 - Alagoas, 2017. http://dx.doi.org/10.9771/cp.v10i3.23203.

[16] SCRIVENER, Karen L., UN ENVIRONMENT, John, VANDELEY M. e GARTNERC, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry, **Cement and Concrete Research,** v.114, 2018.

[17] APRIANTI, Evi; SHAFIGH, Payam; BAHRI, Syamsul; FARAHANI, Javad Nodeh. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials,** 74, pages 176–187, 2014.

[18] WANG, J.; WU, H.; TAM, V.W.Y.; ZUO, J. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p.1004-1014, 2019.

[19] PAPADAKIS, V. G., TSIMAS, S. – Supplementary cementing materials in concrete. Part I: efficiency and design. **Cement and Concrete Research**, n. 32. Elsevier Science Ltd. 2002

[20] LETELIER, Viviana, HENRIQUEZ-JARA, Bastián, MANOSALVA, Miguel, MORICONI, Giacomo - Combined use of waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials, **Waste Management**, 2020.

[21] SILVA, Guilherme, RIBEIRO, Carmen, RIBEIRO, Sidnea, OLIVEIRA, Danielle, OLIVEIRA, Wesley - Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n7-357.

[22] GUNASEKAR, S.; RAMESH, N.; SHIVANI, G. Effective Utilisation of Construction and Demolition Waste (CDW) As Recycled Aggregate in Concrete Construction – A Critical Review**. International Research Journal of Multidisciplinary Technovation** (IRJMT), v.1, p. 465-46, 2019.

[23] CHENG, Y., HUANG, F, LIU, R., LOU, L., LI, G. Test research on effects of waste ceramic polishing powder on the permeability resistance of concrete, **Materials and Structures**, vol 9, 2016.

[24] KHAN, M. A. Mix suitable for concrete 3D printing: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

[25] CHUNG, Jihoon, LEE, Ghang, KIM, Jung-Hoon. Framework for technical specifications of 3D concrete printers. **Automation in Construction,** 2021.

[26] KRISHNARAJA, A. R., GURU, K. V. 3D Printing Concrete: A Review. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.** IOP Publications, doi: 10.1088/1757-899X/1055/1/012033. 2020.

[27] MOHAMMAD, Malek, AL-GHAMDI, Sami, SEERS, Thomas. **High-Performance Light-Weight Concrete for 3D Printing.** F. P. Bos et al. (Eds.): DC 2020, RILEM Bookseries 28. 2020. Disponível em https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_47. Acesso em 12 julho 2021.

[28] ZHANG, Jingchuan, WANG, Jialiang, DONG, Sufen, YU, Xun, HAN, Baoguo. A review of the current progress and application of 3D printed concrete. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,** Volume 125, October 2019.

[29] HAMBACH, Manuel, VOLKMER, Dirk - Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. **Cement and Concrete Composites**. Elsevier Science Direct. 2017

[30] FLORÊNCIO, Eduardo Q, - A impressão 3D em concreto e seu impacto na produção da arquitetura: o futuro da construção civil? **Dissertação**, Universidade Federal de Alagoas - UFAL - Programa Pós-graduação Arquitetura e Urbanismo, Brasil, 2017

[31] DUBALLET, R., BAVEREL, O. DIRREMBERG, J. Classification of building systems for concrete 3D printing. **Automation in Construction**. Volume 83, November 2017, Pages 247-258.

[32] DINI, P., RATHBONE, N., VIDAL, M., HERNANDEZ, P., FERRONATO, P., BRISCONE, G., HENDRIX, S. The digital ecosystems research vision: 2010 and beyond. **European Commission,** 2005. Disponível em <https://web.archive.org /web/20130903230323/http://digital-ecosystems.org/events/2005.05/de_position_paper_vf.pdf>. Acessado em 01 de maio de 2018.

[33] ASPRONE, Domenico, MENNA, Costantino, BOD, Freek P., SALET, Theo A. M., MATA-FALCÓN, Jaime, KAUFMANN, Walter. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. **Cement and Concrete Research,** 2018.