

AVANÇOS DA FABRICAÇÃO DIGITAL APLICADOS À ARQUITETURA

Mariana Sarto Carneiro Leão (IC) e Nieri Soares Araújo (Orientador)

Apoio: PIBIC Mackpesquisa

RESUMO

Os processos de produção, sejam no âmbito acadêmico ou industrial, têm se diversificado cada vez mais em relação às técnicas utilizadas. Com a velocidade dos avanços tecnológicos crescendo exponencialmente, os processos híbridos entre produção digital e analógica são resultados esperados da difusão dessas novas tecnologias disruptivas, se desenvolvendo em conjunto com o trabalho manual. Dentro da fabricação digital, a manufatura aditiva (AM) tem impactado cada vez mais os meios de produção em escala global. O que inicialmente se apresentava como uma singela impressão 3D de protótipos, com o tempo ultrapassou barreiras, chegando à fabricação de peças finais para uma variedade de setores, como o aeroespacial, automotivo e médico, de forma funcional e rápida.

Atualmente, esses processos também estão sendo aplicados de diversas formas na indústria da construção, podendo trazer avanços significativos para o setor, desde prototipagem de modelos a construções inteiras. Com isso, tornam-se necessárias análises e estudos sobre o estado atual desses processos emergentes na arquitetura, bem como das lacunas ainda existentes neste campo. Este artigo discorrerá sobre os processos da manufatura aditiva na arquitetura, analisando seus princípios, processos, possibilidades e lacunas ainda não resolvidas em seu método, bem como exemplos práticos da aplicação da impressão 3D em diferentes escalas de projeto no contexto da arquitetura e design, visando uma produção mais abrangente, precisa e sustentável.

Palavras-chave: Impressão 3D, Prototipagem, Inovação na construção

ABSTRACT

The production processes, whether in the academic or industrial context, have increasingly diversified in relation to the techniques used. With the speed of technological advances growing exponentially, hybrid processes between digital and analog production are expected as results of the diffusion of these new disruptive technologies, developing together with the manual work. In the digital manufacturing, additive manufacturing (AM) has increasingly impacted the production on a global scale. What initially presented itself as a single 3D printing

of prototypes, over time has overcome barriers, reaching the manufacture of final parts for a variety of sectors, such as aerospace, automotive and medical, in a functional and fast way.

Currently, these processes are also being applied in many ways in the construction industry, and can bring innovative advances to the sector, from prototyping models to entire constructions. With that, it becomes necessary to analyze and study the current state of these emerging processes in architecture, as well as the gaps that still exist in this field. This article will discuss additive manufacturing processes in architecture, analyzing its principles, processes, possibilities and gaps that's still unresolved in its method, as well as practical examples of the application of 3D printing at different project scales in the context of architecture and design, aiming to more in-depth, accurate and sustainable production.

Keywords: 3D Printing, Prototyping, Innovation in construction

1. INTRODUÇÃO

Dentro das logicas de produção atuais, os métodos utilizados têm se diversificado em relação às práticas técnicas. Cada vez mais vemos a difusão das novas tecnologias aliadas aos processos já existentes, formando relações híbridas, o que desenvolve novos fluxos, não só de produção como também de forma de pensar a arquitetura (FLORIO, LASAR SEGALL, SOARES DE ARAÚJO, 2007).

A prototipagem rápida oferece oportunidades para investigação de projeto dentro de um processo iterativo, que implica em testes de conceito ao longo de um caminho de refinamento de design. Com isso, o meio arquitetônico tende a ser cada vez mais hábil em incluir esse método, trabalhando com aspectos do design associado a software, especialmente o uso de software de design paramétrico. Mesmo com esse desenvolvimento contínuo, é curioso reparar que, embora a maioria dos arquitetos hoje tenha pelo menos compreensão do termo design paramétrico, muito poucos realmente trabalharam com ele. Alguns anos atrás, quase nenhum arquiteto teria conhecimento de sua existência, por ter uma disseminação muito contida em seu início (KOLAREVIC, 2005).

Atualmente, as tecnologias de Manufatura Aditiva têm impactado diversos setores industriais, demonstrado seu potencial e se desenvolvendo continuamente. A utilização da impressão 3D com o auxílio da metodologia BIM (Building Information Modeling), revela esse novo fluxo de trabalho, que, mesmo num momento inicial, possui perspectivas de desenvolvimento para o futuro (FERREIRA, 2019).

À medida que esse tipo de produção tem crescido, a demanda por peças cada vez maiores e complexas aumentou exponencialmente, alcançando aplicações na indústria da construção, que, seguindo esta tendência, tem explorado a aplicação da impressão 3D não só em protótipos, mas também em escala maior na construção (WOLFES, 2015). Aplicada a estruturas de grande escala, a Manufatura Aditiva tem se tornando um tema de grande interesse devido sua versatilidade e rapidez de produção. Esse tipo de fabricação de estruturas oferece também a oportunidade de automatizar a construção em ambientes mais extremos e hostis, onde a construção convencional pode não ser a melhor estratégia.

A indústria da construção por sua vez, está sendo fomentada por ventos de mudança, equilibrando a necessidade urgente de remediar a deterioração da infraestrutura no mundo desenvolvido e o impulso para construir novas infraestruturas nas economias emergentes, ao mesmo tempo que concebe meios para reduzir sua pegada de carbono catastrófica (KALANTAR et al., 2020). Com esse avanço tecnológico em crescente no mercado, abre-se

também a possibilidade da utilização e estudo de novos materiais e novas formas de se pensar a Arquitetura e Design, com auxílio da Manufatura Aditiva, visando a natureza como modelo, medida e mentora (BENYUS, 2003).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Fabricação Digital

As tecnologias digitais estão mudando as práticas arquitetônicas de maneira que nem se imaginava a uma década atrás. Processos de design orientados digitalmente, caracterizado por transformações dinâmicas, abertas e imprevisíveis, mas consistentes em estruturas tridimensionais, estão dando origem a novas possibilidades arquitetônicas (KOLAREVIC, 2005).

Essas tecnologias afetam não somente o design, mas também os processos de um projeto, agora mais diretos e complexos porque as informações podem ser extraídas, trocadas e utilizadas com muito mais facilidade e rapidez. Essa mudança de processo é muito mais significativa do que a mudança formal, é a convergência digital dos processos de representação e produção que representa uma oportunidade de uma profunda transformação no meio da arquitetura (KOLAREVIC, 2005).

2.2. Manufatura Aditiva

A Manufatura Aditiva é um método fundamental para o entendimento do sistema em estudo, sendo um marco em termos de tecnologia na indústria manufatureira. Ela se define como um processo de junção de materiais para a produção de peças baseadas em informações de um modelo 3D, normalmente em um sistema de sobreposição de camadas, sendo o oposto de manufaturas de método subtrativo (BOURELL, 2020).

Diante de seus diversos processos, para o uso com foco no meio arquitetônico, o método de extrusão está entre os mais acessíveis e utilizados no mundo (VOLPATO, 2017). Dentro do método de extrusão, discorreremos sobre os cinco mais utilizados, sendo eles: Modelagem de Deposição Fundida (FDM), Estereolitografia (SLA), Sintetização Seletiva a Laser (SLS), Multi Jet Infusion (MJF) e Processo de Luz Digital (DLP).

A Tecnologia de Modelagem de Deposição Fundida (FDM), utiliza polímeros em forma de filamento sólido que são aquecidos e depositados na superfície de impressão. Por ser um método aditivo, constitui as peças por camadas de baixo para cima, se tornando o método mais comum no mercado por seu custo mais acessível (PAULSEN, 2020).

A tecnologia Esteriolitográfica (SLA) também se configura como método aditivo, entanto, usa um fotopolímero curável – tipicamente uma resina líquida – que é endurecido pela aplicação de luz focalizada ou luz UV. Impressoras SLA geralmente constroem os modelos de cima para baixo, a plataforma de construção eleva o modelo para cima, saindo do banho de resina (PAULSEN, 2020).

A tecnologia de Sinterização Seletiva a Laser (SLS) é uma fabricação aditiva por meio da Fusão de Leito de pó (Powder Bed Fusion), onde um laser funde as partículas de um pó de polímero, construindo a peça camada por camada. Os materiais usados no SLS são polímeros termoplásticos na forma granular (PAULSEN, 2020).

A tecnologia Multi Jet Infusion (MJF) se apresenta semelhante à de SLS por também ser da categoria Powder Bed Fusion, porém um conjunto de bicos de jato passa sobre o leito de pó e deposita um agente de fusão, que, a partir de uma fonte de energia IR que passa sobre o leito, sinteriza as áreas onde o agente de fusão foi depositado (PAULSEN, 2020).

A Tecnologia de Processo de Luz Digital (DLP), composta de uma tela de projeção digital para exibir uma única imagem de cada camada em toda a plataforma de uma só vez, o processo de impressão começa quando a plataforma de construção desce para um tanque de resina, deixando espaço igual à altura da camada entre a plataforma de construção ou a última camada concluída e a parte inferior do tanque (CUNICO, 2015).

2.3. Contour Crafting

O Contour Crafting (CC), sendo também um método de extrusão, tem grande potencial na construção civil automatizada de estruturas inteiras, bem como de subcomponentes (KHOSHNEVIS, 2004). Um processo de construção automatizado baseado em camadas, comparado com métodos tradicionais de construção, oferece inúmeras vantagens, incluindo novas possibilidades para o projeto arquitetônico, diminuição da geração de resíduos, aumento velocidade de construção e maior grau de customização (KAZEMIAN, 2017).

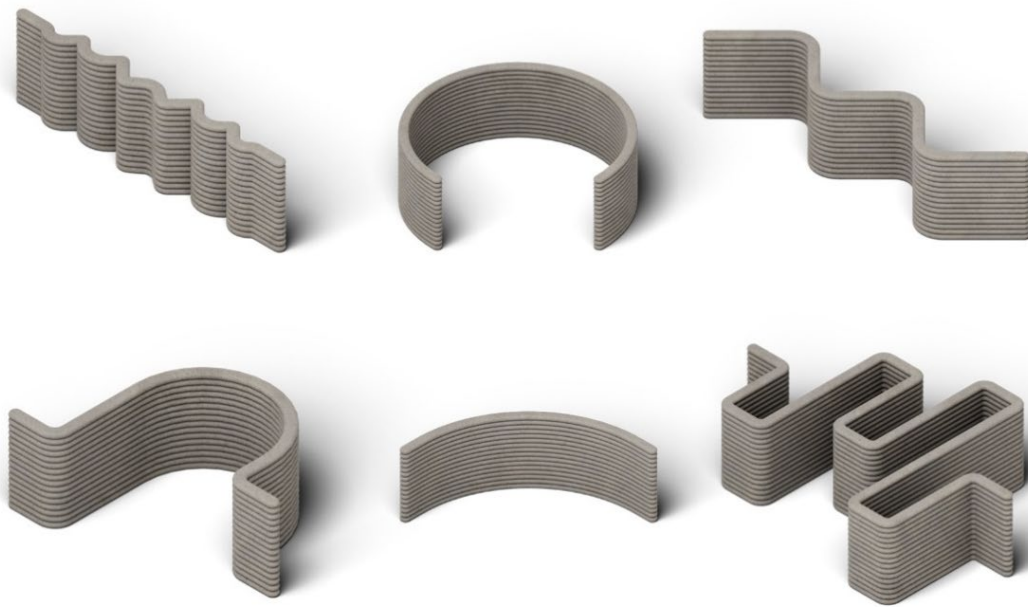


Figura 1 - Possibilidades formais no Contour Crafting (CC).

Fonte: www.iconbuild.com

Essa tecnologia de fabricação de aditivos utiliza controle por computador para explorar a formação de superfícies a partir do método de extrusão, possibilitando maior flexibilidade de formas, maior velocidade de fabricação e uma escolha mais ampla de materiais. Como princípio, a aplicação do CC na construção de edifícios utiliza-se de um sistema de pórtico com o bocal de extrusão move-se em faixas paralelas instaladas na obra (KHOSHNEVIS, 2004). Para aprofundamento da utilização prática atual deste sistema construtivo, partiremos do estudo de caso e análise de projetos de duas empresas em destaque na área: ICON (E.U.A.) e WASP (Itália).

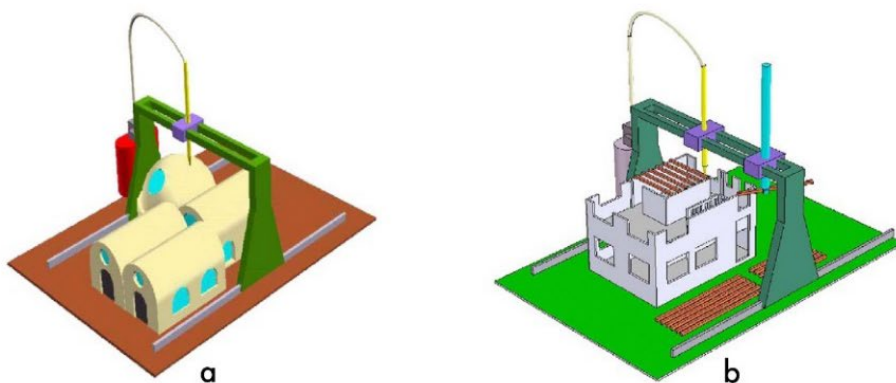


Figura 2 - Configuração do pórtico de CC para construções em Adobe (a) e concreto (b).

Fonte: Behrokh Koshnevis

A ICON, empresa Norte Americana, utiliza a tecnologia de CC para construção de casas e estruturas em grande escala de concreto extrudado. O sistema é composto pela impressora *Vulcan* e pela unidade de mistura portátil *Magma* que prepara o material de construção próprio da empresa, o *Lavacrete*, para impressão. O estudo de caso escolhido para análise é a Comunidade de casas impressas (Tabasco, México), projetada em parceria com a *New Story*, que consiste em casas construídas em 24h, concedidas a famílias locais que atualmente vivem em extrema precariedade e abrigo irregular. Por se encontrar dentro de uma zona sísmica, a comunidade e suas casas foram projetadas incluindo fundações robustas para garantir que as casas resistam aos fenômenos naturais.



Figura 3 - Processo (a), impressora utilizada (b) e resultado da construção (c).

Fonte: www.iconbuild.com

A WASP, empresa pioneira em impressão 3D da Itália, utiliza o sistema de impressão *3D Crane WASP*, que são impressoras projetadas para a construção com materiais encontrados no local e almejando menor custo. O estudo de caso escolhido para análise é a *TECLA* (Ravenna, Itália), modelo de habitat construído pela WASP com projeto assinado pelo escritório Mario Cucinella Architects. Pensado para ser um novo modelo circular de habitação inteiramente criado com materiais reutilizáveis e recicláveis, provenientes de solo local, neutro em carbono e adaptável a qualquer clima e contexto.

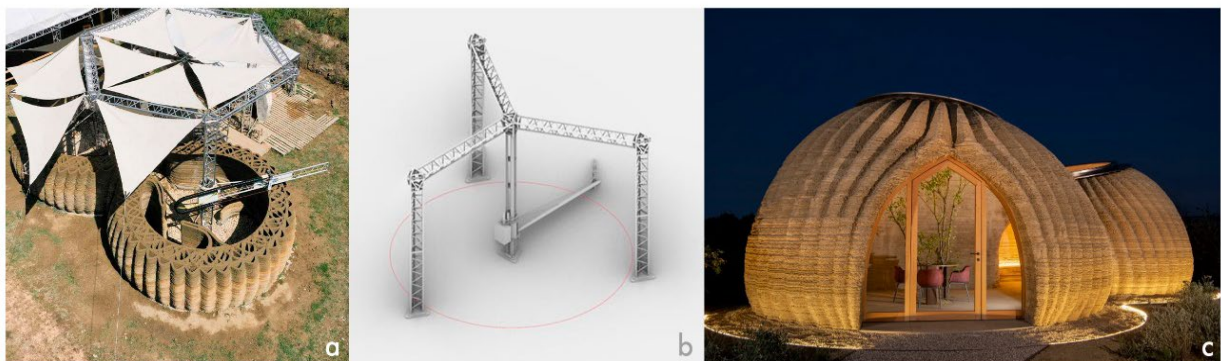


Figura 4 - Processo (a), impressora utilizada (b) e resultado da construção (c).

Fonte: www.3dwasp.com

2.4. Biomimética e sustentabilidade

A necessidade urgente de frear a deterioração causada pela construção civil no mundo desenvolvido e o impulso para construir novas infraestruturas nas economias emergentes deu mais força aos esforços para revigorar a construção através da adoção de novos materiais (KALANTAR et al., 2020). A sustentabilidade e a ênfase na eficiência energética e preservação de recursos desempenham papel central nesses esforços, que prometem uma arquitetura ideal, com soluções biomiméticas e materialidades coerentes e em harmonia com a natureza.

A biomimética nada mais é do que a imitação consciente da genialidade da vida. Quanto mais o nosso mundo funcionar como a natureza, maior a probabilidade de sermos aceitos nesse lar que é nosso, mas não exclusivamente nosso. Talvez, não seja apenas uma transformação tecnológica que nos levará a um futuro de criações surpreendentes, mas uma mudança de sentimentos, uma humildade que nos permita ficar atentos as lições da natureza (BENYUS, 2003).

Pesquisas sobre novos materiais se concentram não apenas no aprimoramento das características do material, mas também no impacto ambiental. Para incorporar a ideia de desenvolvimento sustentável, os novos materiais devem ter menor consumo de energia para sua produção, maior durabilidade possível das estruturas, melhores características de resistência, inclusive em meios hostis, e serem recicláveis após o término de sua utilização. O desenvolvimento de novas tecnologias que irão acelerar os processos de construção e aumentar o desempenho geral possui um papel extremamente importante, sendo a incorporação da impressão 3D na construção um meio de atingir esses objetivos (KASZYNSKA, 2020).

Propõe-se o uso de materiais de origem natural modificados para serem extrudáveis, compactáveis e reticuláveis com rápido ganho de resistência, conforme necessário para a construção de estruturas de suporte de carga. Para isso busca-se, através de estudos principalmente na engenharia e química, desenvolver uma gama totalmente nova de materiais de construção de origem natural com base em solos naturais, que são reconfigurados em formulações compatíveis com a manufatura aditiva (KALANTAR, 2020).

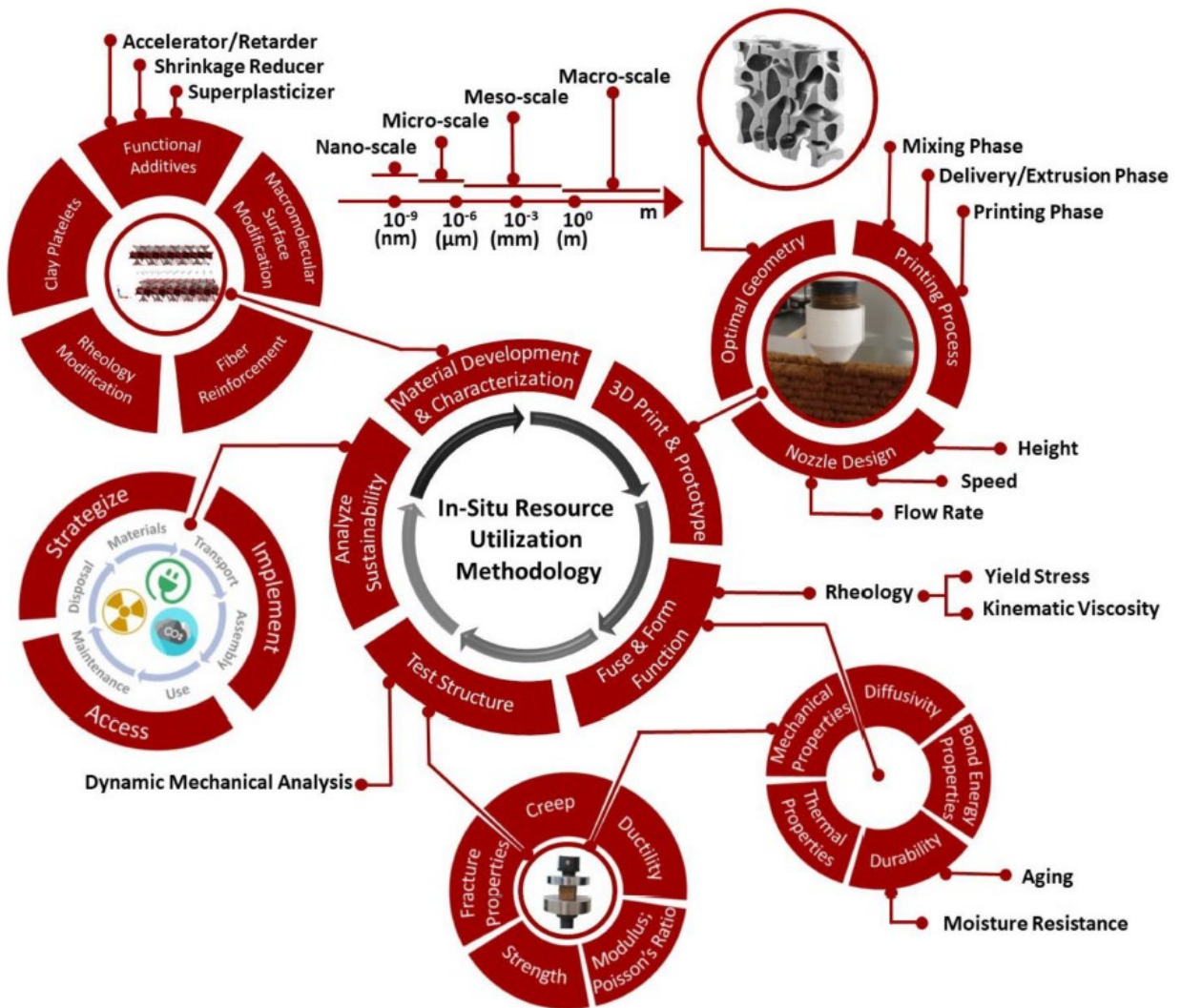


Figura 5 - Método de utilização de material local na tecnologia de extrusão.

Fonte: Negar Kalantar et al.

3. METODOLOGIA

A partir do estudo das tecnologias presentes na prática atual de prototipagem rápida, utilizaremos uma análise qualitativa dos cinco métodos de impressão 3D citados anteriormente e seus respectivos sistemas de funcionamento, apresentada na tabela a seguir:

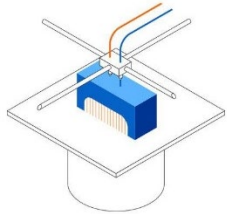
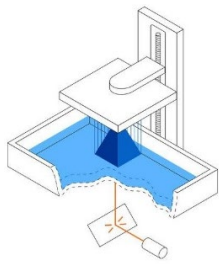
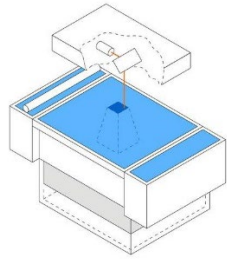
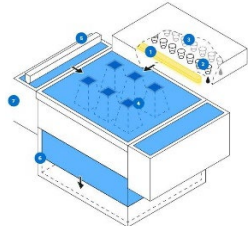
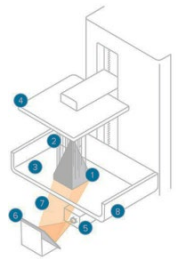
Tecnologia	Funcionamento	Precisão	Velocidade	Preço	Diversidade de materiais
FDM Modelagem de Deposição Fundida		Média	Média	Baixo	Alta
SLA Estereolitografia		Alta	Alta	Médio	Média
SLS Sinterização Seletiva a Laser		Alta	Média	Alto	Alta
MJF <i>Multi Jet Fusion</i>		Alta	Média	Alto	Baixa
DLP Processo de luz digital		Alta	Baixa	Médio	Média

Tabela 1 - Comparação entre sistemas de Manufatura Aditiva.

Fonte: Greg Paulsen

Para as experimentações práticas propostas, foram produzidos protótipos utilizando as impressoras 3D em funcionamento do laboratório de Prototipagem da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo Mackenzie, com a colaboração dos laboratoristas Haron Gabriel, Paulo Freires e Flávio Teixeira, verificando as características dos diferentes testes em uma análise comparativa, em relação as máquinas e seus resultados. A análise das técnicas se dá por alguns aspectos fundamentais, como: tempo de impressão, nível de precisão, qualidade e rendimento. Das impressoras em funcionamento no laboratório, se encontram 3 modelos a serem analisados: *MakerBot Replicator+*, *FELIX Printer 3.0* e *Cliever CL2 Pro*. No laboratório há também uma impressora do modelo *CubeX 3D*, no entanto, ela não se encontra em funcionamento para utilização.

MakerBot Replicator+: utiliza o sistema com filamento fundido (FDM), e aceita filamentos em PLA de 1.75mm. Compatível com arquivos de impressão em formato STL e OBJ. Tamanho máximo de impressão de 295 x 195 x 165mm, com mesa de impressão fria. Há 3 unidades disponíveis no Laboratório.

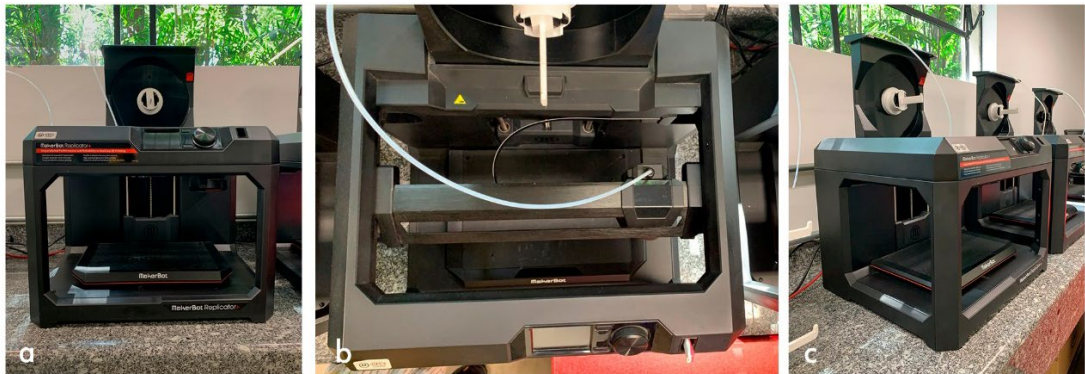


Figura 6 - MakerBot Replicator+, imagem frontal (a), mesa de impressão (b) e isométrica (c). Fonte: Autora

Cliever CL2 Pro: utiliza o sistema com filamento fundido (FDM), e aceita filamentos em PLA, ABS, FLEX e PETG. Compatível com arquivos de impressão em formato STL. Tamanho máximo de impressão de 300 x 230 x 200mm, com mesa de impressão aquecida. Há 1 unidade disponível no Laboratório.

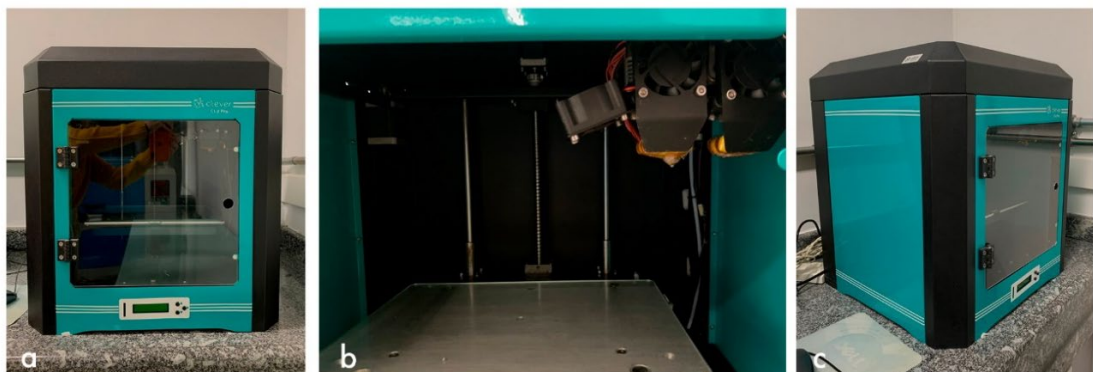


Figura 7 - Impressora Cliever CL2 Pro, imagem frontal (a), mesa de impressão (b) e isométrica (c). Fonte: Autora

FELIX Printer 3.0: utiliza o sistema com filamento fundido (FDM), e aceita filamentos em PLA, ABS, FLEX, PETG, PVA, vidro, madeira etc. Compatível com arquivos de impressão em formato STL. Tamanho máximo de impressão de 255 x 205 x 400mm, com mesa de impressão aquecida. Apresenta possibilidade de atualização, por ser uma impressora do tipo Open Source. Há 2 unidades disponíveis no Laboratório.

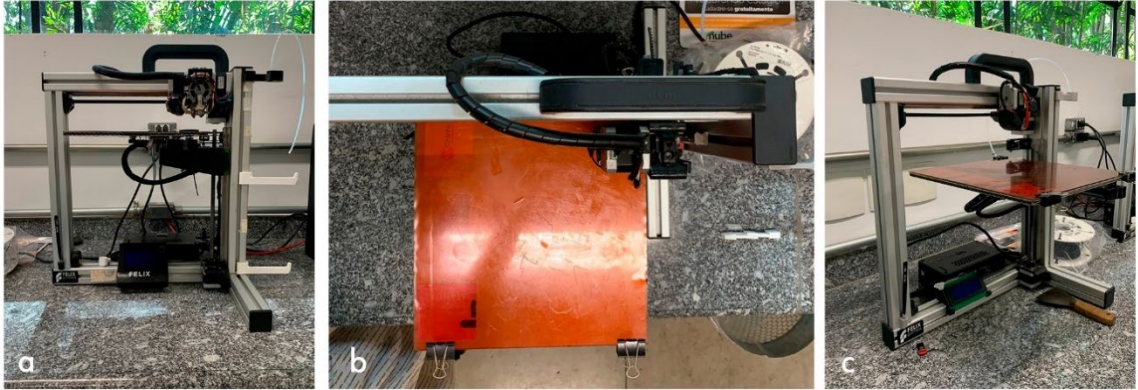


Figura 8 - Impressora FELIX Printer 3.0, imagem frontal (a), mesa de impressão (b) e isométrica (c). Fonte: Autora

CubeX 3D: utiliza o sistema com filamento fundido (FDM), e aceita filamentos em PLA e ABS. Compatível com arquivos de impressão em formato STL. Tamanho máximo de impressão de 275 x 265 x 240mm. Há 1 unidade no Laboratório, porém fora de funcionamento.



Figura 9 - Impressora CubeX 3D, imagem frontal (a), mesa de impressão (b) e isométrica (c). Fonte: Autora

Para o protótipo, foi modelada uma peça curva, posicionada em 2 formas (horizontal e verticalmente). O intuito do modelo é testar os limites de impressão de geometrias mais complexas, levando em consideração os suportes necessários em cada posição, assim como sua superfície de contato.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1. Preparação da impressão

Na experimentação foram colocados os modelos nos 3 programas de saída de suas respectivas impressoras. Pode-se observar diferentes apoios formados entre elas, assim como pequenas diferenças no tempo de impressão e quantidade de material.

Na utilização da MakerBot Replicator+, a impressão teve o tempo de duração de 03h11min, sendo a mais rápida das impressoras analisadas. Gastou um total de 10.67m de filamento, sendo também o menor gasto das impressoras analisadas. Além disso, por apresentas mesa de impressão fria, o sistema da MakerBot Replicator+ inclui automaticamente uma base de apoio espessa obrigatória, influenciando na forma do modelo final.

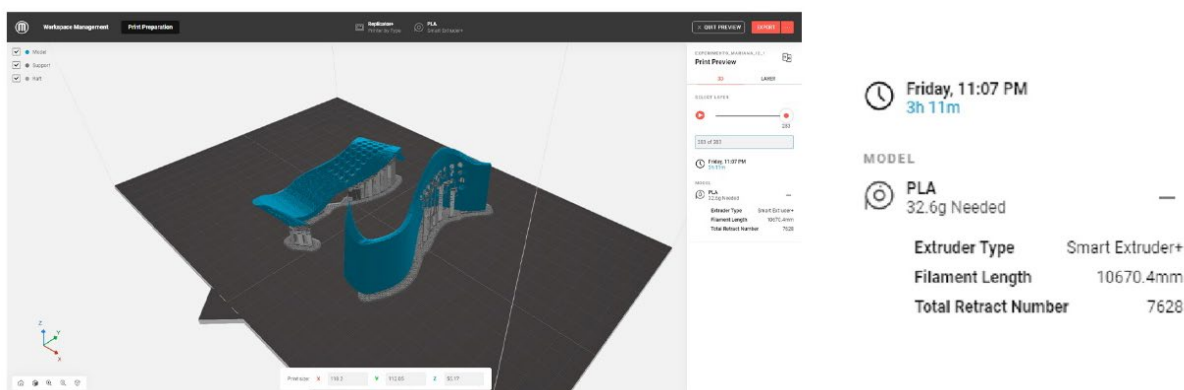


Figura 10 - Interface da MakerBot Replicator+. Fonte: Autora

Na utilização da Cliever CL2 Pro, a impressão teve o maior tempo de duração, com o total de 06h44min. Gastou um total de 12.70m de filamento, mais do que as outras impressoras analisadas.

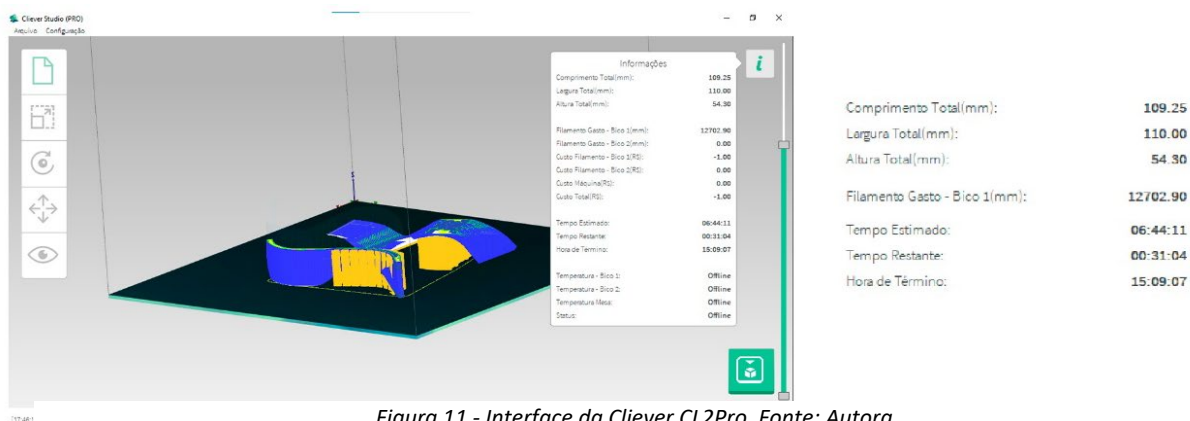


Figura 11 - Interface da Cliever CL2Pro. Fonte: Autora

Na utilização da FELIX Printer 3.0, a impressão teve o tempo de duração de 03h53min. Gastou um total de 11.18m de filamento.

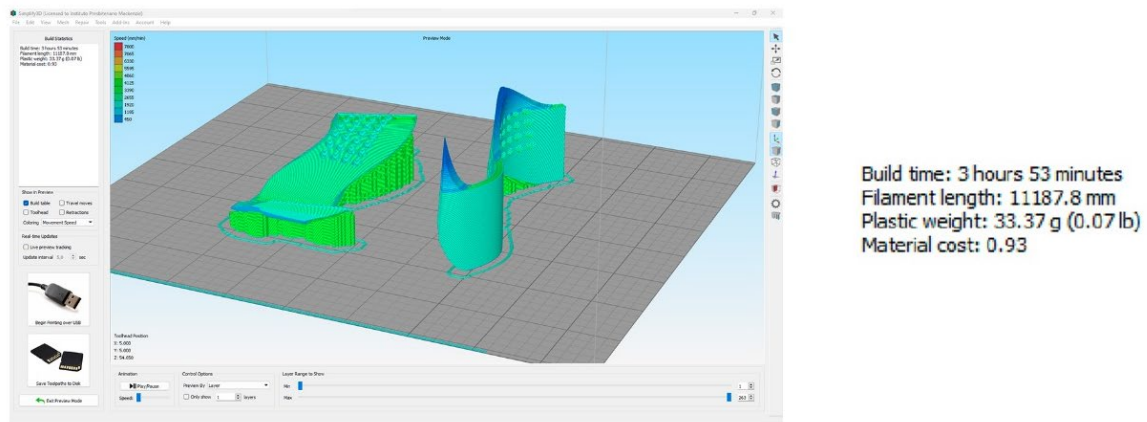


Figura 12 - Interface da FELIX Printer 3.0. Fonte: Autora

Após as configurações do programa, deu-se início às impressões começando pelas margens e apoios, cada impressora seguindo seus apoios posicionados anteriormente.

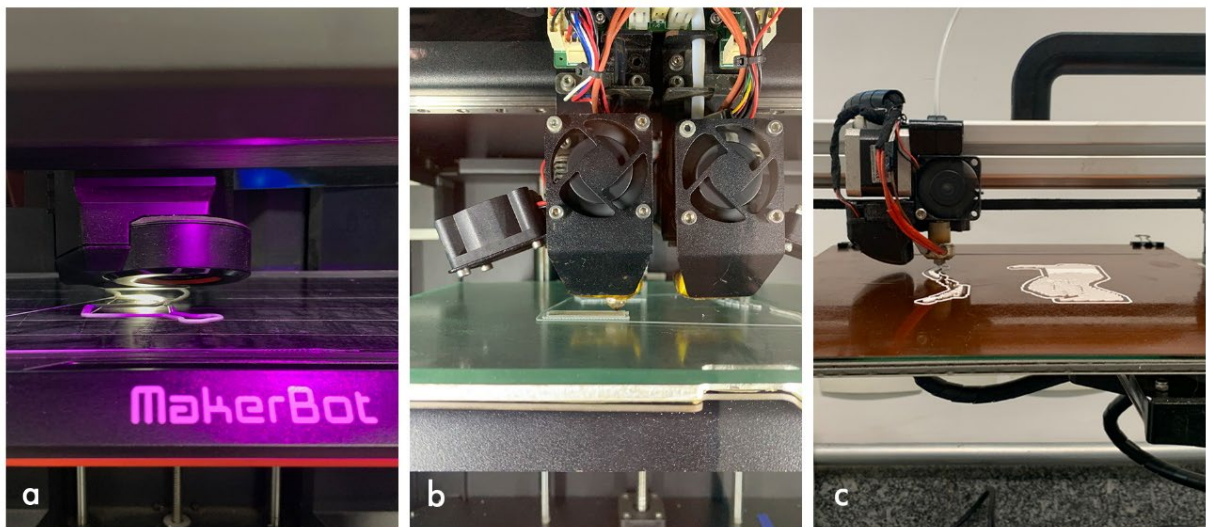


Figura 13 - Início da impressão: MakerBot Replicator+ (a), Cliever CL2 Pro (b) e FELIX Printer 3.0 (c). Fonte: Autora

4.2. Processo de impressão

Durante a impressão, percebeu-se dificuldade nas três impressoras, em níveis diferentes, na execução da forma do protótipo, por consequência de sua geometria complexa e poucos pontos de contato do modelo com a mesa. Percebeu-se também o uso excessivo de suportes, por não estar no melhor posicionamento, gastando muito mais material em sua produção.

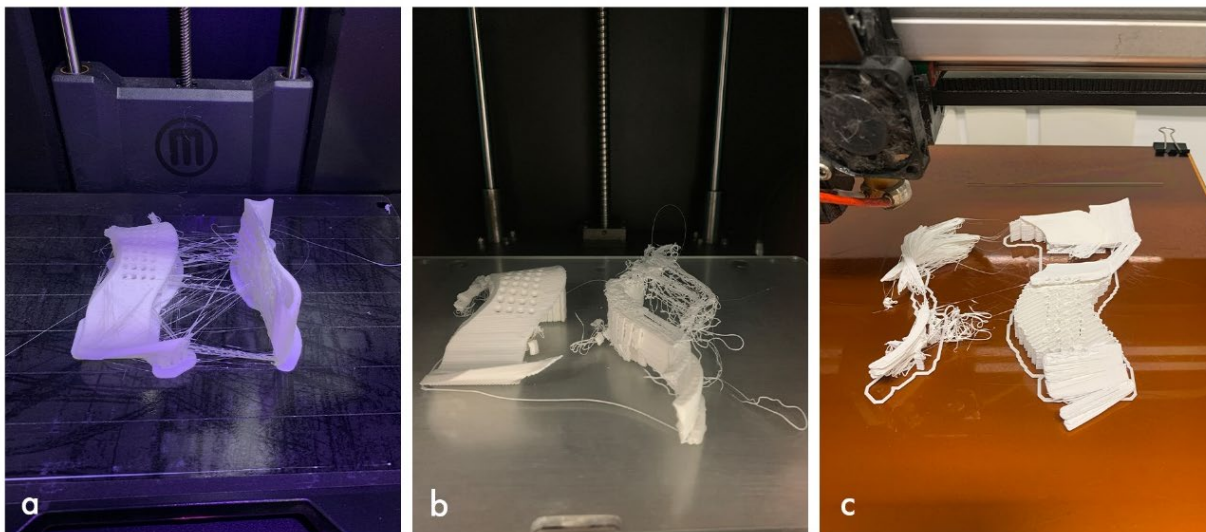


Figura 14 - Processo: MakerBot Replicator+ (a), Cliever CL2 Pro (b) e FELIX Printer 3.0 (c). Fonte: Autora

Dentre os resultados, a FELIX Printer 3.0 apresentou mais dificuldade na execução, enquanto a MakerBot Replicator+ e a Cliever CL2 Pro atingiram resultados mais próximos do modelo, porém não são completamente satisfatórios. Na MakerBot Replicator+, por conta de sua base de suporte espessa, o protótipo atingiu uma forma bem próxima da proposta no modelo, mas com menos precisão. Na Cliever CL2 Pro, a precisão do protótipo foi maior, porém apresenta anomalias na forma pela falta de pontos de contato. Na FELIX Printer 3.0, apesar de sua boa precisão, o protótipo não foi impresso por completo, exibindo grande dificuldade na geometria proposta.

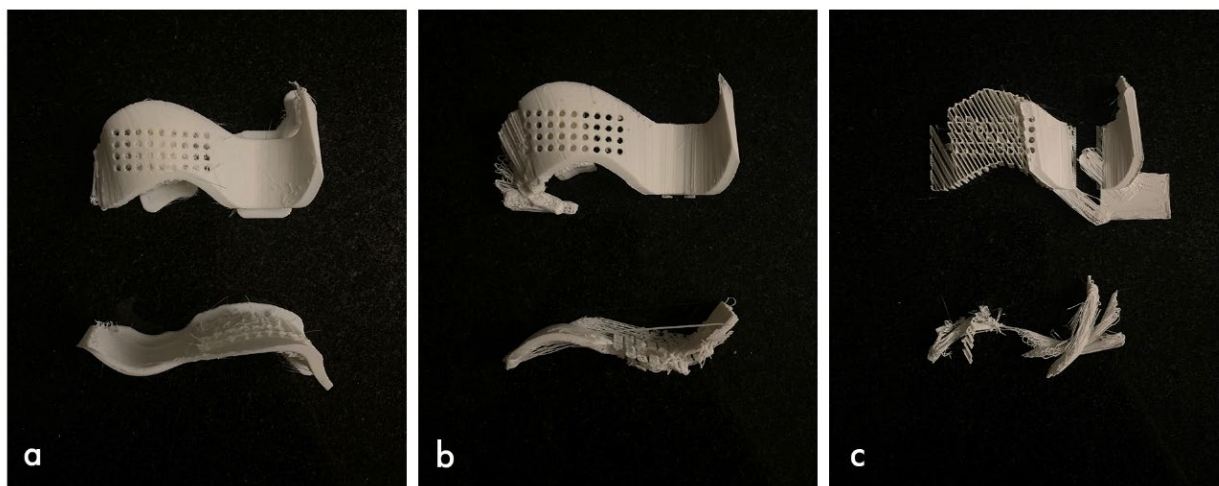


Figura 13 - Resultado: MakerBot Replicator+ (a), Cliever CL2 Pro (b) e FELIX Printer 3.0 (c). Fonte: Autora

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foi possível considerar a relação entre a Manufatura Aditiva e a Arquitetura como um mútuo desenvolvimento, podendo tornar projetos de design minuciosos e complexos realizados através da parametrização, em um protótipo tangível de forma facilitada, o que torna a impressão 3D cada vez mais promissora.

Porém, no âmbito acadêmico, essa tecnologia apresenta diversas condicionantes, que tornam-a menos utilizada em comparação a outros métodos de prototipagem. A Impressão 3D exige grande conhecimento técnico, tanto de modelagem como dos princípios utilizados para impressão, além de utilizar um material específico não muito simples de ser encontrado para ter êxito em sua utilização.

A arquitetura cada vez mais apresenta um caráter muito mais complexo, trazendo a demanda de peças mais assertivas no âmbito formal. Com isso, se mostra necessário o acesso de forma mais acessível a esse conhecimento técnico, dentro das universidades e ambientes profissionais, fomentando a utilização e apropriação das tecnologias que se mostram disponíveis no mercado.

6. REFERÊNCIAS

CUNICO, M. Impressão 3D: o novo meio produtivo. 1ª edição. Curitiba: Concep3D Pesquisas Científicas Ltda, 2015.

BENYUS, J. Biomimética: Inovação inspirada pela natureza. Xª edição. São Paulo: Cultrix, 2003.

BOURELL, D. Introduction to Additive Manufacturing. University of Texas at Austin Terry Wohlers, 2020.

FERREIRA, J. Integração de metodologia BIM com ferramentas de Impressão 3D. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2019.

FLORIO, W.; LASAR SEGALL, M.; SOARES DE ARAÚJO, N. A Contribuição dos Protótipos Rápidos no Processo de Projeto em Arquitetura. Artigo de Pesquisa – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Mackenzie, 2007.

KALANTAR, N. et. al. In situ resource utilization and reconfiguration of soils Into construction materials for the additive manufacturing of buildings. Article, Frontiers in Materials, 2020.

KASZYNSKA, M. 3D Concrete Printing for Sustainable Construction. Artigo, West Pomeranian University of Technology, Szczecin, 2020.

KAZEMIAN, A. Construction-scale 3D printing: shape stability of fresh printing concrete. University of Southern California, Los Angeles, 2017.

KHOSHNEVIS, B. Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. Automation in Construction, University of Southern California, 2004.

KOLAREVIC, B. Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing. Taylor & Francis Group, 2005.

PAULSEN, G. Comparing Five Industrial 3D-Printing Methods: MJF, SLS, FDM, SLA, and DLS. Autodesk University, 2020 Disponível em: <<https://www.autodesk.com/autodesk-university/au-online>> Acesso em: 21 abr. 2021.

VOLPATO, N. Manufatura aditiva; Tecnologias e Aplicações da Impressão 3D. Editora Blucher, 2017. Disponível em: <<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211518/>>. Acesso em: 10 out. 2022.

WOLFES, R. 3D Printing of Concrete Structures. Tese de Graduação, Eindhoven University of Technology, 2015.

Contatos: marisartocl@gmail.com e nieri.araujo@mackenzie.br