



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS/ UFAL  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO/FAU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO/ PPGAU  
MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO/ DEHA

EDUARDO QUINTELLA FLORÊNCIO

**A IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO E SEU IMPACTO NA PRODUÇÃO DA  
ARQUITETURA: O FUTURO DA CONSTRUÇÃO CIVIL?**

**MACEIÓ**

**2019**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS/ UFAL  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO/FAU  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO/ PPGAU  
MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO/ DEHA

EDUARDO QUINTELLA FLORÊNCIO

**A IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO E SEU IMPACTO NA PRODUÇÃO DA  
ARQUITETURA: O FUTURO DA CONSTRUÇÃO CIVIL?**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo (DEHA), Dinâmicas do Espaço Habitado da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção de grau Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Dilson Batista Ferreira

**MACEIÓ**

**2019**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**  
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

F632i Florêncio, Eduardo Quintella.

A impressão 3D em concreto e seu impacto na produção da arquitetura :  
o futuro da construção civil? / Eduardo Quintella Florêncio. – 2019.

157 f.: il. color.

Orientador: Dilson Batista Ferreira.

Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal  
de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação  
em Arquitetura e Urbanismo. Maceió,  
2019.

Bibliografia: f. 153-157.

1. Arquitetura - Impressão tridimensional. 2. Indústria da construção. I.  
Título.

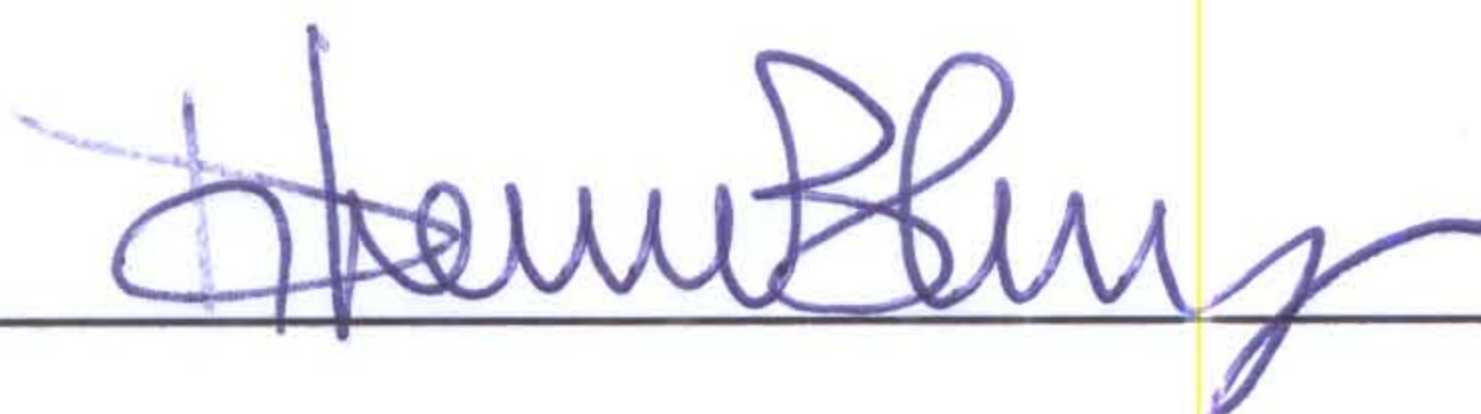
CDU: 72:693.5:004.4

Folha de Aprovação

AUTOR: EDUARDO QUINTELLA FLORÊNCIO

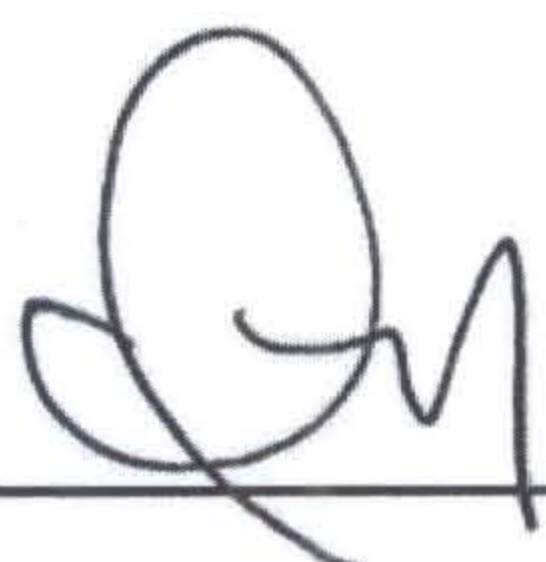
A IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO E SEU IMPACTO NA PRODUÇÃO DA  
ARQUITETURA: O FUTURO DA CONSTRUÇÃO CIVIL?

Dissertação de Mestrado submetida ao corpo docente  
do Programa de Pós Graduação em Arquitetura e  
Urbanismo (DEHA), Dinâmicas do Espaço Habitado da  
Universidade Federal de Alagoas e aprovada em  
28/02/2019.



Prof. Dr. Dilson Batista Ferreira, FAU / UFAL - Orientador

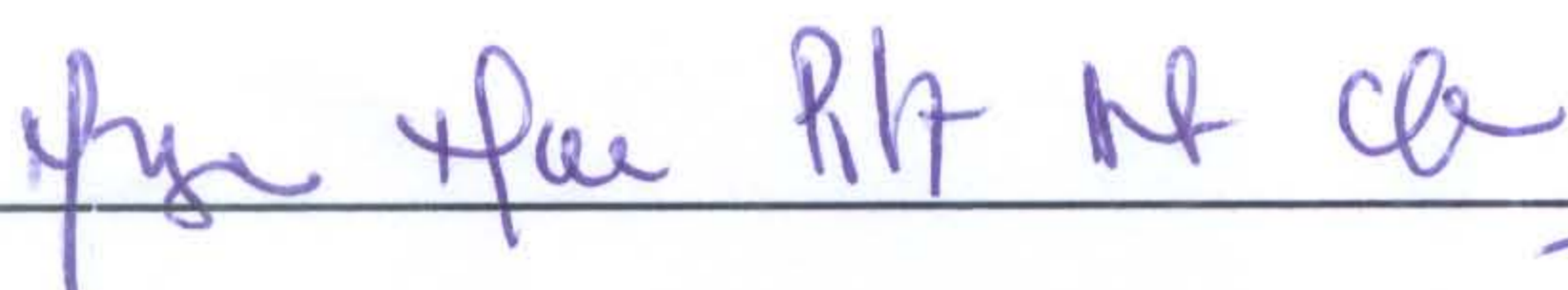
Banca examinadora:



Prof. Dr. Paulo Eduardo Fonseca de Campos, FAU / USP – Examinador externo



Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt, FAU / UFAL – Examinador Interno



Profa. Dra. Morgana Maria Pitta Duarte Cavalcante, FAU / UFAL – Examinadora  
Interna

Dedico este trabalho a todos os profissionais que buscam uma arquitetura de qualidade, mais eficiente, inclusiva, democrática e sustentável, não necessariamente nessa ordem.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que de alguma forma me inspiraram na busca constante por qualificação. Agradeço em primeiro lugar à minha amada esposa, **Ivvy Quintella**, por continuar acreditando no meu potencial e me incentivando sempre e ao meu filho **Levi Quintella**, por tornar minha vida mais bonita. Agradeço especialmente à minha mãe, **Lavinia Quintella**, por todo apoio nos momentos difíceis. Agradeço à minha família, **Marcelo Florêncio**, **Carla Quintella**, **Zerilde Pedrosa** e **Edson Pessôa** pelo incentivo e confiança. Agradeço aos docentes do DEHA, pelo compartilhamento de experiências, especialmente ao meu orientador, prof. dr. **Dilson Batista Ferreira**. Agradeço prof. dr **Leonardo Salazar Bittencourt** e à prof<sup>a</sup>. dr<sup>a</sup>. **Morgana Maria Pitta Duarte Cavalcante**, por aceitarem compor a banca examinadora. Agradeço ao professor **Paulo Eduardo Fonsêca de Campos**, pela receptividade e por aceitar o convite como examinador externo. Agradeço ao querido professor **Bianor Monteiro Lima** (*in memoriam*), pelos ensinamentos e orientação na graduação em Arquitetura e Urbanismo pela UFAL. Agradeço especialmente aos professores **Adeildo Ramos** e **Eduardo Setton** e toda a equipe do Laboratório de Computação Científica e Visualização **LCCV** pela confiança, apoio e oportunidades de crescimento profissional. Agradeço especialmente aos professores **Josealdo Tonholo** e **Silvia Uchôa** pela confiança e oportunidades com o **PROFNIT**. Agradeço ao professor **Paulo César Correia Gomes** e a equipe do Laboratório de Materiais **LEMA/UFAL**. Agradeço ao professor **Marcos Vieira**, **Renata Fonseca**, **Áurea Andrade** e toda a equipe do **SEBRAE/AL**. Agradeço ao professor **Daniel Fontan** pelo apoio, ensinamentos e parceria. Agradeço aos meus colegas de mestrado **Eduardo Henrique Silva** e **Rafael dos Santos** pelos bons momentos de compartilhamento de experiências e amizade. Agradeço à todos os colegas do Mestrado PROFNIT, em especial à **Nádia Corso**, **Lêda Morgana** e **Thiago Arraes**. Agradeço à **3D Home Construction** pela receptividade e entrevista. Agradeço finalmente a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui. Muito obrigado!

Esta dissertação teve o apoio financeiro através de bolsa da Coordenação de Aperfeiçoamento de Nível Superior (**CAPES**), fundamental para o seu desenvolvimento.

“FABRICAÇÃO DIGITAL: para que e para quem? Devemos permitir que a aplicação das tecnologias de fabricação digital aconteça de maneira mais simples e menos arrogante.”

## RESUMO

O processo de automatização na indústria de manufatura evoluiu tecnologicamente de maneira exponencial no último século. Por outro lado, o setor da construção civil, especialmente no Brasil permaneceu em grande parte vinculado a processos baseados em mão de obra, intensiva e artesanal. Apesar do avanço obtido com o uso de gerenciamento de projetos nas construções, da tecnologia de modelagem da informação da construção (BIM) e da adoção de alguns elementos pré-fabricados em concreto, as obras que utilizam alvenaria e concreto armado continuam sendo feitas artesanalmente em sua maioria. Nas últimas décadas, a crescente disponibilidade e difusão das tecnologias de fabricação digital CNC (*computer numeric control*) no mercado foi, aos poucos, sendo incorporada pelo setor da construção civil. A partir do início do milênio, o surgimento da tecnologia de impressão 3D em concreto tornou possível uma flexibilização ainda maior, especialmente no âmbito da pré-fabricação em concreto para construção civil. Especula-se que o advento da impressão 3D em concreto será capaz de reduzir o distanciamento entre as indústrias de construção civil e de manufatura, prometendo gerar benefícios econômicos, ambientais e impactar o processo projetual e construtivo. Trata-se de trazer para o canteiro de obras o princípio *file to factory*, que interliga o projeto digital diretamente ao seu processo de fabricação. Nesse contexto, a presente pesquisa tem como foco discutir a tecnologia da impressão 3D em concreto para uso na construção civil. Após um levantamento sobre o estado da arte, buscou-se avaliar seu potencial transformador e suas limitações em relação à produção da arquitetura, bem como sua viabilidade frente ao contexto da pesquisa e da prática da construção civil no Brasil. A metodologia baseou-se em dois pilares principais: 1- estudo descritivo, buscando traçar um panorama e contextualizar o estado da arte por meio do mapeamento das pesquisas em desenvolvimento; e 2- análise comparativa a partir de estudos de caso de impressão 3D em concreto selecionados por critério de relevância, comparando-os com processos de construção tradicionalmente empregados no Brasil. A partir dos resultados da análise, foi possível elencar algumas potencialidades e dificuldades relacionadas à implantação dessa tecnologia nos canteiros de obra. Além das vantagens inerentes ao ambiente controlado encontrado na indústria de pré-fabricação em concreto, foi



percebido um ganho em sustentabilidade, segurança do trabalho e liberdade projetual. Todavia, malgrado tal tecnologia vir alcançando notoriedade em nível mundial, constatou-se que o tema ainda é pouco explorado em pesquisas no Brasil. Enquanto dificuldades, alguns dos aspectos levantados apontam o próprio conservadorismo da indústria da construção civil, que se apegava ao método artesanal, o alto custo de implantação tecnológica e a necessidade de uma nova categoria de profissionais qualificados dentro do canteiro de obras. Espera-se que esta pesquisa sirva como contribuição na divulgação dessa tecnologia no contexto brasileiro, incentivando a formação de profissionais de arquitetura e engenharia aptos a atuar nas novas lógicas de concepção e produção do espaço construído.

**Palavras-chave:** Impressão 3D em Concreto, Manufatura aditiva, *file-to factory*.

## ABSTRACT

The process of automation in the manufacturing industry has evolved technologically exponentially in the last century. On the other hand, the civil construction sector, especially in Brazil, remained largely linked to processes based on human, intensive and artisanal labor. Despite the progress made with the use of construction project management and construction information modeling technology (BIM), works that use masonry and reinforced concrete continue to be handcrafted. In recent decades, the increasing availability of computer numerical control (CNC) technologies in the market has been gradually being incorporated by the civil construction industry, mainly for use in precast and precast products. However, from the beginning of the millennium, the emergence of 3D printing technology in concrete has made it possible to reduce distancing between the civil construction and manufacturing industries, promising to generate economic benefits, for the environment, for the design and construction process. It is about bringing to the construction site the principle of file to factory, which interconnects the digital design directly to its manufacturing process. In this context, the present research focuses on the technology of 3D printing in concrete for use in civil construction. After a survey on the state of the art, its transformative potential and its limitations in relation to the production of the architecture, as well as its viability in the context of research and construction practice in Brazil, could be evaluated. The methodology was based on two main pillars: 1 - a descriptive field study, seeking to draw a panorama and contextualize the state of the art by mapping the researches in development; and 2- comparative analysis from case studies of 3D printing in concrete selected by criterion of relevance, comparing them with construction processes traditionally employed in Brazil. From the results of the analysis, it was possible to list some potentialities and difficulties related to the implantation of this technology in the construction sites and research laboratories. Advantages were perceived in terms of sustainability, work safety and greater freedom for the designer, the result of automation without the limitation of standardization. However, despite the fact that this technology has become notorious worldwide, it has been verified that the subject is still little explored in researches in Brazil. While difficulties, some of the aspects raised point to the very conservatism of the construction industry, which is attached to the craft method, the high cost of technological implementation and the need for a

new category of professional within the construction site. It is hoped that this research will serve as support material and contribution in the dissemination of this technology in the Brazilian context, encouraging the training of architectural and engineering professionals able to act in the new logics of design and production of the built space.

**Keywords:** 3D concrete printing; additive manufacturing; file-to factory.

## SUMÁRIO

Resumo _____	08
Abstract _____	10
<b>Introdução: o ser humano e as máquinas</b> _____	15
Objeto de estudo _____	18
Objetivos _____	23
Metodologia _____	24
Contribuição ao campo disciplinar _____	26
Motivação _____	27
Estrutura da dissertação _____	29
<b>Cap. 1: Fabricação digital na construção civil</b> _____	33
1.1. O contexto mercadológico da Construção Civil _____	33
1.2. Pré- fabricação e pré-montagem _____	38
1.3. A evolução das tecnologias CAD/CAM _____	40
1.4. Design para manufatura e montagem de bens de consumo _____	45
1.5. Desenho para Manufatura em impressão 3D em concreto _____	47
1.6. Tipos de manufatura no contexto da fabricação digital _____	48
<b>Cap. 2: Impressão 3D no contexto da fabricação digital</b> _____	50
2.1. Entendendo a impressão 3D _____	50
2.2. Surgimento e evolução da impressão 3D _____	51
2.2.1. Estereolitografia (SLA) _____	51
2.2.2. <i>Vat photopolymerization</i> _____	56
2.2.3. <i>Powder bed fusion</i> _____	56
2.2.4. <i>Binder Jetting</i> _____	57
2.2.5. <i>Direct energy Deposition</i> _____	57

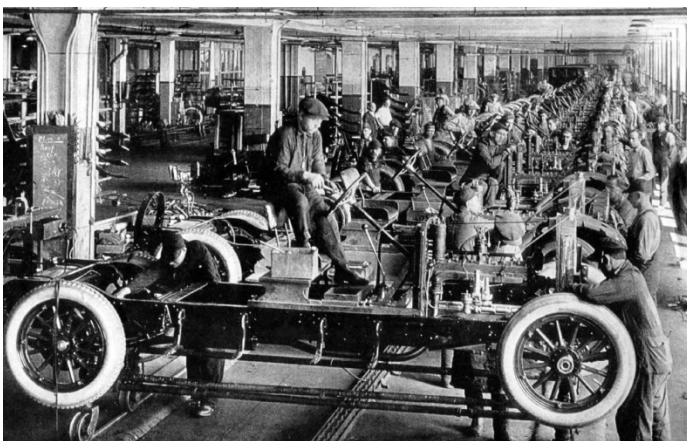
2.2.6. <i>Sheet Lamination</i> _____	58
2.2.7. <i>Material Jetting</i> _____	58
2.2.8. <i>Material extrusion</i> (extrusão de material) _____	59
2.3. Fluxo de trabalho para imprimir em 3D _____	59
2.4. Vantagens da manufatura aditiva _____	63
2.5. O projeto RepRap _____	69
2.6. Impressão 3D na arquitetura _____	73
<b>Cap. 3: Impressão 3D em concreto</b> _____	76
3.1. Modelagem por deposição material pastoso (LDM) _____	78
3.2. Condicionantes de “printabilidade” _____	83
3.3. Sistema de bombeamento para extrusão LDM _____	85
3.3.1 – Tipos de sistema extrusor para LDM _____	88
3.3.2 – Mecanismos extrusores para LDM _____	90
3.4. Classificação dos materiais e equipamentos _____	96
3.4.1. Dispositivos <i>Desktop</i> _____	96
3.4.2. Dispositivos Industriais _____	97
3.4.3. Concreto para uso em impressora 3D: resultado de estudo prospectivo_	98
3.5. Particle Bed 3D printing – Impressão 3D sobre camada de partículas _____	99
3.5.1. Considerações sobre impressão 3D por ativação seletiva _____	105
3.6. Primeiras iniciativas: Meados dos anos 1990 até 2010 _____	106
3.6.1. Contour Crafting - Behrokh Khoshnevis _____	106
3.6.2. Totalkustom - Andrey Rudenko: a criação de uma impressora 3D para concreto como apoio do fórum do projeto RepRap _____	110
3.6.3. Freeform Construction - Loughborough University _____	116
3.6.4. D-Shape – Enrico Dini _____	120
3.7. Impressão 3d Em Concreto: A Segunda Geração (2010/atual) _____	126

3.7.1. Winsun _____	126
3.7.2. 4TU.Bouw _____	129
3.7.3. ETH Zurich _____	133
3.7.4. Apis Cor _____	136
3.7.5. Icon _____	138
3.7.6. XtreeE, _____	139
3.7.7. Iniciativas de 3DCP no Brasil _____	141
<b>Conclusão</b> _____	146
<b>Referências Bibliográficas</b> _____	153

## INTRODUÇÃO: O SER HUMANO E SUAS MÁQUINAS

Tomando como ponto de partida a Revolução Industrial (Inglaterra, final do século XVIII), temos o início da produção de bens de consumo em larga escala. O uso de maquinário mecânico, movido a vapor, naquele momento, trouxe a precisão e a velocidade necessárias para lidar com tarefas complexas e pesadas, inerentes às escalas de produção demandadas. Apesar do papel central das máquinas nesse contexto, a Revolução Industrial dependeu de um conjunto determinante de ações como logística e expansão para novos mercados para que fosse configurada como tal. A alta capacidade de produção, sozinha, não seria capaz de mudar a lógica mundial das relações comerciais e dos modos de vida da maneira como aconteceu (MANTOUX, 2013 p. 57,).

A evolução da Indústria fomentou o aumento da complexidade dos arranjos produtivos e das novas demandas de mercado que iam surgindo. Da criação das primeiras linhas de montagem em 1909 por Henry Ford, até as fábricas autônomas da atualidade, a indústria de manufatura evoluiu exponencialmente, permitindo mudanças profundas na economia e na cultura mundiais. Basta olhar ao redor para perceber que quase tudo que as pessoas utilizam diariamente foi criado utilizando algum tipo de processo de automação industrial, que combina sistemas mecânicos, eletrônicos e computadorizados.



Figs. 1 e 2: linha de montagem da Ford e fábrica de automóveis contemporânea. Fontes: <https://www.todoestudo.com.br/geografia/fordismo> e <http://autoetecnica.band.uol.com.br/>

O tamanho, o local de manufatura, a quantidade de repetições, o tempo de vida útil e o custo de fabricação dos objetos são apenas alguns dos elementos que influenciam diretamente na viabilidade econômica da produção. Fatores como a

longevidade das edificações feitas em concreto armado e a obsolescência programada praticada pela indústria de manufatura de objetos de consumo moldam o comportamento e a dinâmica dos diversos segmentos industriais. Itens de maior porte como os fabricados pelas indústrias automotiva, aeronáutica e naval costumam envolver um maior nível de complexidade nos processos onde a automatização se faz presente.

A alta tecnologia também é utilizada na indústria de pré-fabricação em concreto há algumas décadas. Indústrias como a Sudeste Pré-Fabricados, em Americana/SP oferecem produtos como a *SDT Double Wall*, bem como painéis arquitetônicos com texturas impressas por molde, que são paredes inteiras feitas em concreto com alto controle de qualidade e certificação ABCIC (Associação Brasileira da Construção Industrializada de Concreto).



Fig. 3: Painel arquitetônico. Fonte: <https://sudeste.com.br/produto/painel-arquitetonico/>; figs. 4 e 5: Fábrica da Sudeste Pré-Fabricados. Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=IH2AQmSaHxQ>

Apesar da estrutura e tecnologia disponíveis no Brasil, historicamente, consumo de concreto na indústria de pré-fabricação não ultrapassou 6% do total utilizado nas obras da construção civil. Esse fato indica uma preferência pelo concreto utilizado de forma artesanal, misturado no local da obra, ou adquirido em centrais de concreto (concreteiras).

Edificações feitas em concreto moldado no local e alvenaria se apoiam em processos artesanais que distanciam o setor da construção civil da dinâmica automatizada presente na indústria de manufatura (KHOSHNEVIS, 2004, p.5). Além disso, o setor da construção depende de questões econômicas, culturais, sociais, políticas e principalmente econômicas, tornando sua evolução lenta quando comparada à indústria de manufatura.



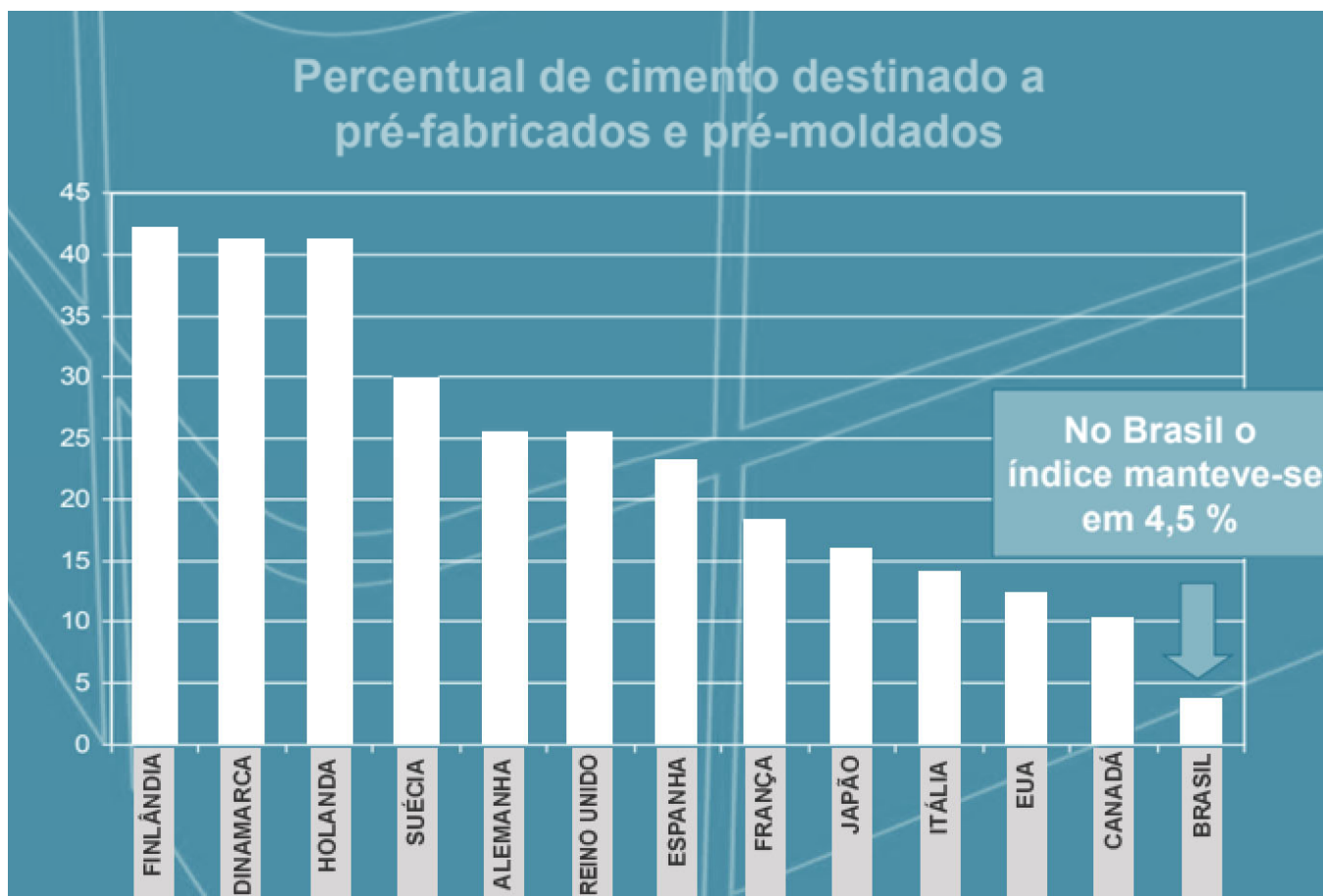


Fig. 6: Gráfico comparativo situando o Brasil com relação ao consumo de concreto na indústria de pré-fabricação. Fonte: [http://site.abcic.org.br/pdfs\\_curso\\_basico/SALVADOR-13-05-2014.pdf](http://site.abcic.org.br/pdfs_curso_basico/SALVADOR-13-05-2014.pdf)

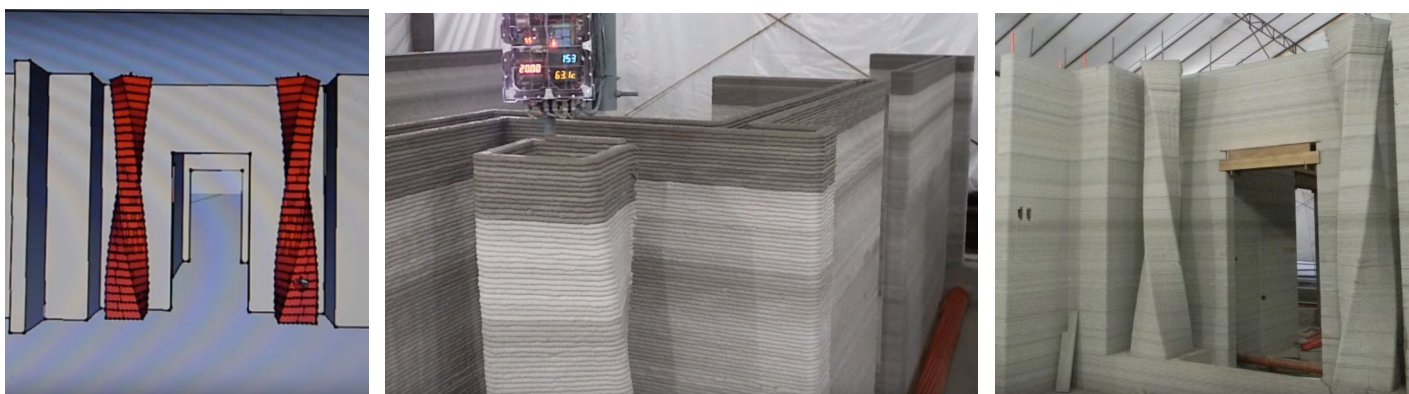
Nas últimas décadas, a busca por processos construtivos mais eficientes fez com que ferramentas de fabricação digital, amplamente utilizadas pela indústria de manufatura, fossem empregadas na construção civil. Assim, tecnologias CNC (*computer numeric control*) passaram a ser empregadas na fabricação de pré-moldados, fôrmas e pré-fabricados. Dentre os novos caminhos experimentados para o desenvolvimento da construção civil na era digital, destaca-se a introdução da fabricação CNC de grandes estruturas monolíticas fabricadas diretamente no local da edificação, possibilitada pelo advento da tecnologia de manufatura aditiva como a impressão 3D em concreto.

Tal lógica diferencia-se drasticamente dos processos construtivos tradicionalmente utilizados até a atualidade. O desenvolvimento da impressão 3D em concreto vem gerando resultados promissores com possibilidades de uso na indústria de pré-fabricação e nos canteiros de obra envolvendo, também, aspectos acerca do processo conceutivo e construtivo das edificações. Esta pesquisa

abordará alguns dos principais aspectos relacionados a esta tecnologia, investigando os possíveis impactos na produção da arquitetura e na construção civil.

## OBJETO DE ESTUDO:

A tecnologia de impressão 3D em concreto, 3DCP (*3D concrete printing*) promete minimizar determinadas fragilidades encontradas principalmente no setor de edificações da construção civil, tal como o uso intensivo de processos artesanais, o desperdício de materiais, o impacto ambiental e a alta incidência de acidentes de trabalho. Nesse sentido, o caminho apontado busca mostrar uma ferramenta tecnológica que permita diminuir o distanciamento entre os setores da construção civil tradicional e industrializado, baseado em ambiente industrial de pré-fabricação.



Figs. 7,8 e 9: Processo *file to factory*. Desenho digital em 3D sendo impresso em concreto. Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=zb3zuk1qNDk>

Dentre as diversas possibilidades da 3DCP na construção civil, destacam-se duas aplicações: mercados da produção em massa de estruturas simples, com variações possíveis, e a fabricação sob demanda de itens complexos e únicos (peças especiais), cuja execução se torne inviável ou mesmo impossível utilizando-se os métodos tradicionais (LABONNOTE et al. 2016). O procedimento para imprimir o material concreto é semelhante ao adotado pelas impressoras FDM (*fused deposition modeling*) que utilizam polímeros. Em ambos os casos, o modelo 3D é desenhado, ou gerado por algoritmos em um *software* de modelagem tridimensional, e posteriormente fatiado em camadas bidimensionais por outro *software*, que determinará diversos parâmetros, tais como espessura das camadas, velocidade de extrusão, deposição e preenchimento das paredes para todo o modelo.

Diversas pesquisas e aplicações acerca do *building printing* em concreto (3DCP) vêm sendo desenvolvidas em todo o mundo. Um dos pioneiros e principais desenvolvedores de estudos sobre essa tecnologia é o projeto “Contour Crafting”, liderado pelo professor Behrokh Khoshnevis, baseado na Universidade do Sul da Califórnia (USC), nos Estados Unidos (FONSECA DE CAMPOS, 2017). Khoshnevis explica a possível revolução da aplicação desse sistema no processo construtivo: “Aumentando a escala das impressoras 3D convencionais, esperamos construir bairros inteiros de moradias dignas, utilizando uma fração do custo e do tempo em um ambiente muito mais seguro e oferecendo uma flexibilidade formal sem precedentes”<sup>1</sup>.

Seus experimentos demonstraram, em teoria, a capacidade de imprimir uma casa inteira em vinte horas. Uma das premissas de Khoshnevis para o projeto Contour Crafting é a construção segura em ambientes hostis. Nesse sentido, estudos são conduzidos em parceria entre USC e a NASA para utilizar a tecnologia Contour Crafting em solo lunar.



Figs. 10,11 e 12: O professor Behrokh Khoshnevis em seu laboratório na UCS. Parede curva construída por impressão 3D em concreto pela tecnologia Contour Crafting. Ilustração de construção em concreto na lua. Fontes: <https://3dprint.com/53437/contour-crafting-dr-khoshnevis/>; [https://www.researchgate.net/publication/303738799\\_Current\\_Challenges\\_and\\_Future\\_Perspectives\\_of\\_3D\\_Concrete\\_Printing/figures?lo=1](https://www.researchgate.net/publication/303738799_Current_Challenges_and_Future_Perspectives_of_3D_Concrete_Printing/figures?lo=1); <https://www.archdaily.com/554739/nasa-tech-brief-awards-contour-crafting-s-automated-construction-methodology-top-honors/543429a0c07a8049f5000126-nasa-tech-brief-awards-contour-crafting-s-automated-construction-methodology-top-honors-photo>;

<sup>1</sup> KHOSHNEVIS, B. “Contour Crafting: Automated Construction”. Palestra proferida em 2012 no evento TEDEXOjai. Tradução do autor. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog>;

Relacionam-se, a seguir, algumas das principais vantagens atribuídas ao uso da impressão 3D do concreto segundo, em comparação ao processo construtivo convencional, fora do ambiente industrial de pré-fabricação:

- **Redução de custos e de tempo da obra:** A automatização do processo construtivo possibilita fazer mais em menos tempo. Considera-se que o uso desta tecnologia implica diretamente na redução de mão de obra braçal, havendo também uma significativa redução no desperdício de material.

- **Precisão da execução:** A tecnologia CAD/CAM permite que o projeto desenhado no computador seja transmitido diretamente para as máquinas de produção (*file to factory*). Uma vez que implica na eliminação da necessidade de interpretação do projeto por intermediários para proceder à fabricação, evita a maioria dos problemas gerados por falha humana.

- **Liberdade projetual:** A impressão 3D em concreto promete materializar formas provenientes de meios digitais para projeto utilizados há décadas, porém inviáveis, ou impossíveis de serem executadas sem o uso da manufatura aditiva. Especialmente, a soma das tecnologias de manufatura aditiva, subtrativa e formativa para fabricação digital utilizando concreto permite construir em escala industrial com uma flexibilidade formal sem precedentes. Na produção em série, o custo do produto final depende da repetição em grandes quantidades para compensar o valor do desenvolvimento do projeto. O processo construtivo baseado na fabricação digital implica na possibilidade de automatização sem necessidade de padronização, a chamada “customização em massa”.

- **Redução do impacto ambiental:** O *building printing* promete reduzir o consumo de energia, água e a poluição ambiental no setor da construção civil. O processo construtivo tradicional é responsável por gerar quantidade considerável de sobras de material, seja por desperdício de materiais diversos ou como resíduos provenientes do descarte de fôrmas não reaproveitáveis. A construção valendo-se da impressão 3D em concreto pode ser comparativamente mais sustentável por permitir a construção de paredes com materiais compostos por um percentual proveniente de reciclagem, dispensando também o uso de fôrmas. Por tirar partido da manufatura aditiva, o objeto é formado por material depositado apenas onde é necessário, resultando em um desperdício mínimo.

- **Otimização do processo de gerenciamento de projetos e obras:** um dos grandes problemas da construção civil é sua dificuldade em coordenar com eficiência todos os processos que envolvem sua realização. O uso desta tecnologia promete, no âmbito da gestão de projetos, reduzir os riscos, atenuando os caminhos críticos de uma obra como erros de interpretação e de execução e logística. A tecnologia também busca oferecer mais confiabilidade ao projeto, uma vez que diversos pacotes de trabalho que dependiam de pessoas, agora podem ser feitos por maquinário informatizado, aumentando a segurança do trabalho. Além disso, ela pode ser uma ferramenta útil no controle de custos, devido a sua maior previsibilidade, evitando a extrapolação do orçamento previsto para a execução da obra.

- **Logística:** Na modalidade *in situ*, a 3DCP pode ser realizada diretamente sobre o terreno, não dependendo completamente do transporte de peças e nem de estocagem.

- **Possibilidade de redução do déficit habitacional:** A questão habitacional não se restringe, nem será solucionada com a oferta de moradia. Ela envolve muitas questões que não dependem apenas da relação com a construção civil. Nesse sentido, a oferta de mais moradias em menos tempo, caso obedeça a um padrão de qualidade e com menor custo, poderia vir a ser transformada em uma ferramenta de vantagem social. Também se destaca sua possibilidade de utilização em situações em que a mobilização de equipe de trabalho se torna crítica, como a construção em lugares remotos, ou no auxílio à reestruturação de áreas que sofreram catástrofes naturais. Em algumas pesquisas, o concreto utilizado possui fibras em sua composição, oferecendo resistência superior, tendo seu uso recomendável em regiões propensas a terremotos. No caso brasileiro, algumas das possibilidades de aplicação social seria o programa governamental de acesso à moradia “Minha casa, minha vida”, bem como as reconstruções emergenciais para vítimas de enchentes e deslizamentos.

Diante de benefícios em princípio tão promissores, quais seriam as desvantagens e dificuldades de implantação da impressão 3D em concreto no contexto mundial? Um dos aspectos mais relevantes que entravam o desenvolvimento dessa tecnologia diz respeito ao próprio conservadorismo da

indústria da construção civil, com sua preferência pelos métodos de construção artesanais. Também se considera o alto custo de desenvolvimento inicial, que envolve a aquisição/aluguel de maquinário, e treinamento, ou terceirização de mão de obra especializada na operação e manutenção dos equipamentos. Há de se considerar também a resistência social em revolucionar um dos setores que mais empregam mão-de-obra braçal, que, no Brasil, ainda é abundante e barata.

Com relação ao impacto nos postos de trabalho, existe uma preocupação quanto ao aumento do desemprego no setor da construção civil. Vale lembrar que a “indústria automobilística e a agricultura já passaram por esta transição, e que ela acontece gradualmente, retirando pessoas da zona de risco enquanto promove novos postos de trabalho mais especializados e seguros”<sup>2</sup>, promovendo melhores resultados econômicos e avanços qualitativos do produto final.

Apesar da velocidade dos processos globalizados, quais seriam os entraves para a introdução e consolidação desta tecnologia no caso do Brasil? Seria essa uma alternativa viável, possível e desejável para o nosso contexto? Buscando contextualizar as questões apresentadas, esta pesquisa pretende abordar como tema a tecnologia da impressão 3D em concreto e sua aplicação na indústria da construção civil. Objetiva-se, por meio deste estudo, compreender seus possíveis impactos para o processo projetual e construtivo da arquitetura, avaliando seu potencial transformador nesse campo.

Quanto ao estado da arte no campo da pesquisa no Brasil, há um interesse crescente acerca da utilização das tecnologias CAD/ CAM no contexto da arquitetura e urbanismo. Pode-se constatar esse crescimento a partir do surgimento de diversos laboratórios em universidades e de artigos publicados em congressos da área, tal como o SIGRADI. Todavia, as pesquisas atuais acerca da fabricação digital em arquitetura estão concentradas mais em questões como a prototipagem rápida e seu impacto no ensino de projeto, e a fabricação por processos subtrativos. Após um período inicial, não se localizou pesquisas acerca da impressão 3D em concreto realizadas no Brasil. Porém, no decorrer desta pesquisa, algumas iniciativas surgiram de forma incipiente, sem muitos resultados relevantes na área. Por outro

---

<sup>2</sup> KHOSHNEVIS, B. “Contour Crafting: Automated Construction”. Palestra proferida em 2012 no evento TEDExOjai. Tradução do autor. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=JdbJP8Gxqog>;

lado, foi detectado um aumento significativo de iniciativas acerca de 3DCP em diversos países, com pesquisas sendo conduzidas principalmente em universidades estrangeiras, tais como, Universidade do Sul da Califórnia USC, Loughborough, ETHZ, MIT, TU Delft, TU Eindhoven, dentre outras.

Segundo Silva (2009), a desinformação seria o fator determinante para a não incorporação das tecnologias de fabricação digital no Brasil:

(...) a razão principal para a não incorporação da fabricação digital na projeção e construção de edificações no Brasil deve-se, neste momento, essencialmente à desinformação muito mais do que a uma alegada indisponibilidade tecnológica, à falta de formação e treinamento formal no contexto do ensino de projeto de arquitetura e à falta de ligações mais próximas entre escolas de arquitetura e a indústria da construção civil. (SILVA, 2009, pp. 1-2).

Constata-se também que ainda não há uma formação significativa acerca das tecnologias CAD/ CAM nas escolas de arquitetura e de engenharia, sobretudo voltadas para as suas aplicações na construção civil. Esta pesquisa pretende ser uma contribuição para a divulgação dessas tecnologias no contexto brasileiro, incentivando também a formação de profissionais aptos a atuar nessa nova lógica de concepção e produção, visando o desenvolvimento de uma construção civil mais eficiente, sustentável e inovadora no Brasil.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo Geral:**

Compreender a tecnologia de impressão 3D em concreto em relação ao seu potencial transformador para o processo de produção da arquitetura, avaliando sua viabilidade frente ao contexto da pesquisa e da construção civil no Brasil.

### **Objetivos Específicos:**

- Contextualizar o estado da arte da impressão 3D em concreto no âmbito mundial, traçando seu histórico e identificando as principais pesquisas acerca dessa tecnologia.
- Compreender os princípios e técnicas relacionados especificamente à manufatura aditiva, destacando-a no contexto das tecnologias de fabricação digital.

- Inventariar e descrever as principais iniciativas em impressão 3D em concreto a partir do seu viés tecnológico.
- Analisar os métodos mais relevantes, identificando e comparando dados provenientes dos principais núcleos de pesquisa e desenvolvimento sobre essa tecnologia, a fim de entender o atual status de maturidade tecnológica, suas limitações e possibilidades para o futuro.
- Contextualizar a impressão 3D em concreto no cenário da indústria de pré-fabricados e indústria artesanal, refletindo sobre sua factibilidade no contexto brasileiro

## **METODOLOGIA**

A metodologia da presente pesquisa baseou-se em três eixos principais:

- 1- Contextualização do estado da arte da impressão 3D em concreto no âmbito da automação da construção civil, por meio do mapeamento das principais pesquisas acerca dessa tecnologia.
- 2- Descrição tecnológica das principais modalidades de impressão 3D em concreto, abordando desde tecnologias pioneiras até iniciativas mais recentes, compreendendo o intervalo de tempo entre os anos de 1997 até 2018.
- 3- Análise comparativa e classificação das principais tecnologias apresentadas, refletindo sobre sua factibilidade e possibilidades de aplicação no contexto da indústria da construção civil no Brasil.

Para a primeira etapa, elaborou-se uma prospecção por artigos, publicações e patentes que contemplassem de maneira mais específica a tecnologia em questão. Apesar de se tratar de impressão 3D em concreto, o uso dos termos “*3D concrete printing*”, “*concrete printing*” e “*concrete 3D printing*” em inglês e em português nas buscas não foi suficiente para minerar resultados de forma ampla e obter as informações desejadas. Por outro lado, o uso dos termos *Large Scale additive manufacturing*, (manufatura aditiva em escala ampliada), em combinação com *concrete printing* (impressão 3D em concreto) e *liquid deposition modeling* (modelagem por deposição de líquido), permitiram acesso às publicações feitas



pelos autores de base (FLORÊNCIO et Al, 2017). Outro ponto importante na contextualização do estado da arte do objeto de estudo, recai sobre a relação entre a fabricação digital e a mudança no papel desempenhado pelos arquitetos inseridos nesse contexto, sustentando a hipótese da existência um potencial transformador na fase de concepção de projeto e produção da arquitetura.

Foram mapeadas as principais modalidades de impressão 3D em concreto, visando separar as informações mais relevantes, identificando os países, as diferentes modalidades e o nível de maturidade onde a tecnologia de impressão 3D em concreto foi desenvolvida. Tais descrições levaram em consideração características técnicas sobre a tecnologia empregada em cada máquina apresentada, como área, tipo de maquinário, *software*, *hardware*, tipo de concreto utilizado, espessuras de camada, logística de montagem, etc.

A partir do inventário de estudos de caso de pesquisas e empresas baseadas em impressão 3D de concreto selecionadas por critério de relevância, buscou-se elaborar uma análise comparativa a partir de suas tecnologias aplicadas, bem como suas vantagens e desvantagens. A partir dos resultados da análise, foi possível elencar algumas potencialidades e dificuldades relacionadas à implantação dessa tecnologia nos canteiros de obra e laboratórios de pesquisa, inclusive no contexto brasileiro.

No sentido de apontar as modalidades mais compatíveis com a dinâmica encontrada nos canteiros de obra do Brasil, foram considerados fatores como complexidade tecnológica, disponibilidade de equipamentos e custo. Tal como vem acontecendo com a impressão 3D convencional, a possibilidade de pequenas empresas fabricarem máquinas para impressão 3D em concreto, tendo como base projetos *open source* já é realidade.

Apesar de não termos registros até o momento sobre o uso comercial da impressão 3D em concreto nos canteiros de obra do Brasil, algumas iniciativas feitas no âmbito acadêmico prometem inserir a tecnologia em breve. Atualmente foi identificado um grupo, localizado no Rio Grande do Norte, com potencial para criar um negócio sustentável.

## CONTRIBUIÇÃO AO CAMPO DISCIPLINAR

O tema proposto possui adequação à linha de pesquisa 2 – Construção concepção e adequação do espaço habitado, do Programa de Pós-graduação em Dinâmicas do Espaço Habitado (DEHA). O enfoque dessa linha: “compreende o estudo dos vários processos de produção do espaço construído assim como dos arcabouços conceituais, formais e tecnológicos que dão suporte ao desenvolvimento de projetos de conformação de espaços arquitetônicos, paisagísticos e urbanísticos destinados às atividades humanas.”. A abordagem temática enfocada interliga-se especialmente a alguns dos temas de pesquisa desenvolvidos pelo orientador preferencial, Prof. Dr. Dilson Batista Ferreira, a saber: “Processos e ciclos de gerenciamento do projeto e obra; Gestão de projetos e obras; estudos de tecnologias construtivas aplicadas ao espaço habitado”. A pesquisa proposta gera uma contribuição ao campo disciplinar, visto que:

- Apresenta um novo método construtivo, com potencial de gerar um impacto transformador no processo tradicionalmente utilizado na construção civil. Trata-se de um tema com certa carga de ineditismo e inovação tecnológica enquanto objeto de pesquisa, ainda pouco explorado em estudos no Brasil. Pretende-se, com o desenvolvimento desta pesquisa, contribuir para o estado da arte acerca do tema proposto.
- A impressão 3D em concreto, por se tratar de tecnologia *file to factory*, implica em novos modos de conceber e executar o projeto arquitetônico, impactando diretamente na formação do arquiteto e urbanista.
- O estudo dessa tecnologia, que tem despertado cada vez mais interesse mundialmente, poderá auxiliar no processo de sincronia de tendências construtivas, fornecendo um suporte teórico inicial para a contextualização dessa prática no Brasil.
- Objetiva-se, futuramente, por meio do embasamento proporcionado pela pesquisa de mestrado, desenvolver uma tese de doutorado que envolva também uma abordagem prática documentada dessa tecnologia, sob a forma de experimentos construtivos (pesquisa exploratória), potencializando a possibilidade de desenvolvimento de elementos de inovação

## MOTIVAÇÃO

De acordo com a ferramenta de avaliação tecnológica da NASA, “TRL”, ou *technology readiness level*, que descreve a prontidão tecnológica de um produto, ou empresa, a impressão 3D em concreto atingiu o nível 9, mais alto na escala. Apesar de não estar presente até o momento nos canteiros de obras do Brasil, tal tecnologia se encontra em estágio comercial em países como Estados Unidos (ex.: TotalKustom), França (ex.: Xtree), Rússia (ex.: Specavia), China (ex.: WinSun), entre outros. Com quase duas décadas de pesquisa e desenvolvimento aplicados, a 3DCP ultrapassou diversas fases de amadurecimento e se encontra atualmente pronta para a utilização efetiva, embora ainda dependa que testes de validação para atualizações normativas. Já é possível comprar maquinário e material específico.

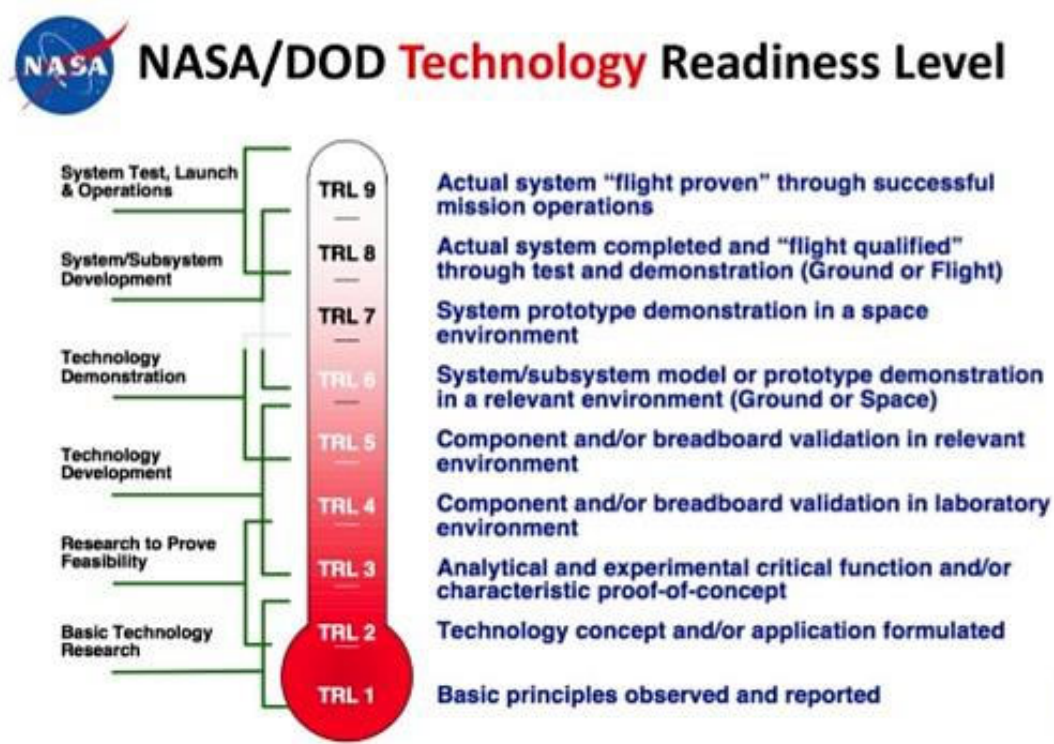


Fig. 13: Indicador de prontidão tecnológica. Fonte: <http://timkastelle.org/blog/2014/05/how-to-know-when-your-great-idea-is-ready-for-the-world/>;

Apesar disso, o Brasil ainda não aderiu ao uso da 3DCP, nem como ferramenta de suporte à indústria da pré-fabricação na construção civil. Fatores como o conservadorismo do setor da construção, a burocracia e a dificuldade para financiar projetos de pesquisa e desenvolvimento dentro de universidades são parte

das causas dessa demora. Outro fato que comprova a falta de investimento em P&D nesse nicho é a ausência de patentes depositadas no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial) sobre impressão 3D em concreto.

BRASIL Acesso à informação Participe Serviços Legislação Canais

Instituto Nacional da Propriedade Industrial  
Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI [ Início | Ajuda? ]

**RESULTADO DA PESQUISA**(12/03/2018 às 11:02:57)

**Pesquisa por:**  
Todas as palavras: "'IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO" no Título \

- Nenhum resultado foi encontrado para a sua pesquisa. Para efetuar outra pesquisa, pressione o botão de VOLTAR.

**AVISO:** Depois de fazer uma busca no banco de dados do INPI, ainda que os resultados possam parecer satisfatórios, não se deve concluir que a Patente poderá ser concedida. O INPI no momento do exame do pedido de Patente realizará nova busca que será submetida ao exame técnico que decidirá a respeito da concessão da Patente.

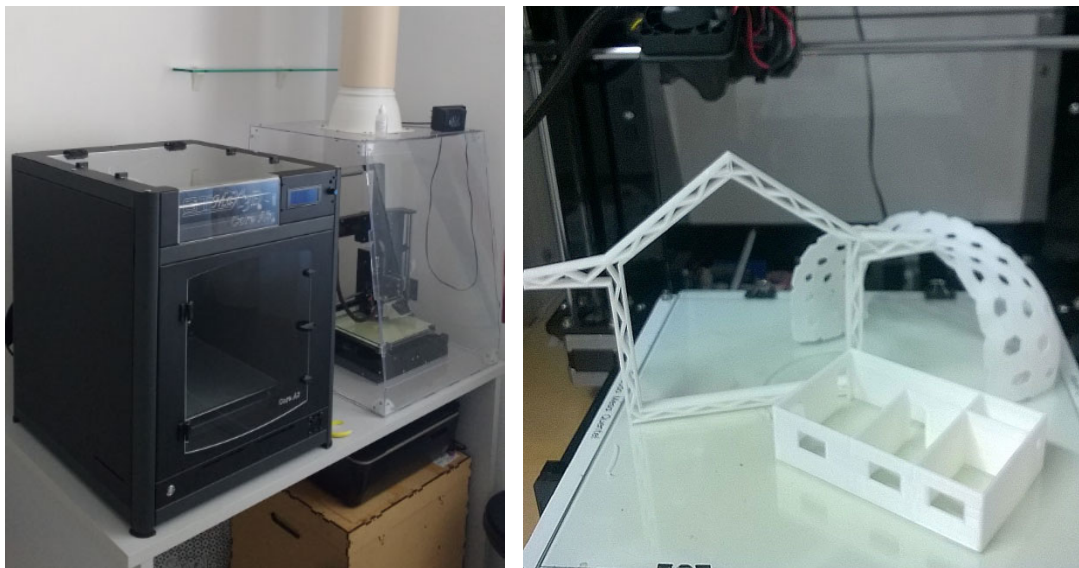
Dados atualizados até 06/03/2018 - Nº da Revista: 2461

Fig. 14: Base de busca patentária do INPI – Brasil. Fonte: <http://www.inpi.gov.br/>;

A vanguarda de outros países na utilização de impressão 3D em concreto certamente influenciará investidores brasileiros a apostar na tecnologia. Enquanto isso não se evidencia de maneira comercialmente viável, verificam-se indícios para esta tendência a partir da adesão do setor da construção civil às técnicas de gerenciamento de projetos, BIM e construção enxuta. O surgimento de algumas *startups* como a 3D Home Construction, iniciativa privada com apoio das universidades UNP e UFRN, no Rio Grande do Norte, apesar de ainda estar em estágio de desenvolvimento, sinaliza que teremos empresas introduzindo a 3DCP aqui no Brasil. Alinhada com a realidade da impressão 3D a empresa nacional fabricante de software para cálculo estrutural, (Altoqi-Eberick), divulga implementação de saída para arquivo digital compatível com manufatura aditiva, preparando-se para futuras demandas do setor.

Acredita-se, assim, que o estudo científico voltado para a tecnologia de impressão 3D em concreto pode servir como auxílio para futuras pesquisas e desenvolvimento de máquinas, processos e materiais nesse contexto. Do ponto de vista de afinidade, o autor da dissertação debruça-se sobre um tema familiar em sua formação. Contando com 20 anos de experiência em modelagem 3D e computação gráfica para visualização, projetos de arquitetura e vivência em canteiro de obras, a motivação em fazer essa pesquisa surgiu após assistir vídeos do projeto Contour Crafting. Naquele momento, o discurso do professor Behrokh Khoshnevis da USC no

evento TedTalk<sup>1</sup>, em 2012, despertou a curiosidade e serviu de incentivo para pesquisar sobre uma ferramenta talvez capaz de causar um impacto disruptivo no setor da construção civil.



Figs. 15 e 16: Impressoras 3D FDM adquiridas pelo autor; peças modeladas e impressas.

A aquisição, pelo autor, de impressoras FDM no ano de 2016 (figuras 15 e 16), ampliou o entendimento sobre as possibilidades da impressão 3D para construção civil, auxiliando em um só tempo na elaboração da pesquisa e no planejamento para futuros projetos que envolvem a fabricação de máquinas capazes de imprimir peças em concreto e argila.

### **ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO:**

Esta pesquisa está organizada em cinco seções: Introdução; Cap.1: Fabricação digital na construção civil, Cap.2: Impressão 3D no contexto da fabricação digital, Cap.3: Impressão 3D em concreto e Resultados e conclusão.

O capítulo 1, **“Fabricação digital na construção civil”**, aborda um breve histórico acerca da indústria da construção civil no Brasil, conceitua as tecnologias CAD/CAM, descrevendo sua evolução nos setores da indústria de manufatura e construção civil. Este capítulo aborda o conceito de desenho para manufatura e montagem, fundamental para o entendimento de fabricação digital e sua relação com o projeto de arquitetura e design.

O capítulo 2, “**Impressão 3D no contexto da fabricação digital**”, aborda os conceitos e tipos de fabricação digital existentes, tecendo um histórico sobre a fabricação por controle numérico CNC e descrevendo os principais tipos de manufatura, como a aditiva, subtrativa e formativa. A modalidade de fabricação aditiva representada pela impressão 3D é abordada em detalhes nesse capítulo. São providas informações sobre as origens da impressão 3D, conceitos, tipos e mecanismos de funcionamento, incluindo software e hardware.

- O capítulo 3, “**Impressão 3D em concreto**” apresenta de forma mais aprofundada o objeto da pesquisa, abordando o estado da arte da impressão 3D em concreto e como se deu sua evolução até o momento. É apresentada a categoria LDM, que contempla a impressão 3D de materiais pastosos com ênfase na modalidade de extrusão de concreto fresco e maquinários complementares utilizado na construção civil e prototipagem. São discutidas as diversas modalidades e arranjos possíveis no âmbito da impressão 3D em grande escala, especialmente as mais amadurecidas tecnologicamente e também as possíveis de serem feitas com baixo custo, que utilizam o concreto como insumo.

Dentre a literatura disponível, são abordadas as iniciativas para tecnologias distintas que utilizam a impressão 3D em concreto e que se destacam pela sua relevância: o Contour Crafting (CC), da Universidade do Sul da Califórnia, o FreeForm Construction, da universidade de Loughborough, no Reino Unido, o projeto D-Shape, do engenheiro civil italiano Enrico Dini, o projeto da empresa italiana WASP, o projeto da empresas totalkustom, XtreeE, apiscor dentre outros.

No sentido de discutir as possibilidades aplicáveis à impressão 3D em concreto 2.5D, foram analisados alguns exemplos de construções feitas com esta técnica. Nesse sentido, são apresentados os resultados obtidos por algumas empresas, como a TotalKustom, Apiscor e WinSun. Por se tratar de um sistema possível de ser desenvolvido (*software* e *hardware*) com tecnologia conhecida, simples, de baixo custo, e de patente livre, acredita-se que este tipo de maquinário poderia ser inserido em canteiros de obra do Brasil.

Também neste capítulo, a impressão 3D em concreto no Brasil é contextualizada, indicando os possíveis impactos desta tecnologia na cadeia produtiva da indústria da construção civil artesanal e baseada em pré-fabricação,

com destaque para aqueles considerados inovadores. Foi evidenciado o campo inexplorado existente nos materiais através de um estudo prospectivo.

Na **conclusão**, foram mostrados os resultados alcançados, apresentando embasamento para se discutir sobre os impactos que a tecnologia de impressão 3D em concreto poderá trazer para a construção civil e quais os setores poderão usufruir de maior benefício.

A close-up photograph of a grey corduroy fabric, showing the characteristic ribbed texture. The ridges are uniform in height and spacing, creating a rhythmic pattern across the frame. The lighting is soft, highlighting the three-dimensional quality of the ridges.

# CAPÍTULO 1



## CAP. 1: FABRICAÇÃO DIGITAL NA CONSTRUÇÃO CIVIL

### 1.1. O contexto mercadológico da Construção civil

A indústria da construção civil no Brasil possui importância estratégica para a economia do país. Sua capacidade de absorver mão de obra, em todos os níveis de escolaridade, permite que ela seja responsável por cerca de 8,67% dos empregos formais (dados do IBGE, 2014). Diferentemente da indústria de manufatura, que evoluiu exponencialmente desde o início da revolução industrial (sec. XIX), a construção civil, especialmente no Brasil, possui um perfil predominantemente conservador e atrelado em grande parte a processos de produção artesanais. Um dos motivos que mantém essa característica pode ser explicado pelo baixo custo da mão de obra e pela grande margem de lucro obtido, principalmente pelo setor imobiliário (fator social e econômico).

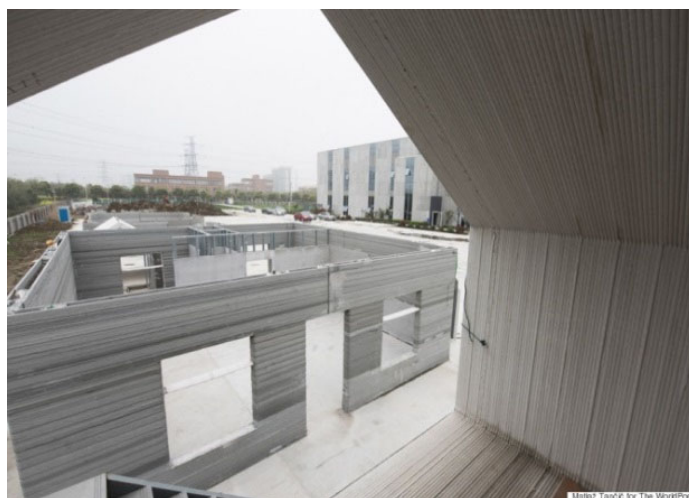
Por outro lado, diante de um cenário cada vez mais competitivo, o setor se depara com a necessidade de inovar para conseguir manter o giro de capital necessário ao seu funcionamento e crescimento. Crises econômicas, aumento da concorrência, escassez de novas áreas, excesso de estoque de unidades e pressão por parte dos sindicatos dos trabalhadores são apenas alguns dos fatores que fazem o setor sair da chamada “zona de conforto”.

#### PESSOAL OCUPADO E PARTICIPAÇÃO NO TOTAL BRASIL - SEGUNDO OS GRUPOS DE ATIVIDADES

Ano	Agropecuária		Indústria				Serviços				Total	
	Total	Participação %	Total	Participação %	Construção Civil	Participação %	Total	Participação %	Atividades Imobiliárias	Participação %	Total Brasil	Participação %
2000	16.728.521	21,24	14.586.911	18,52	5.579.533	7,09	47.429.083	60,23	311.775	0,40	78.744.515	100,00
2001	16.046.601	20,22	14.531.427	18,32	5.603.994	7,06	48.762.562	61,46	311.478	0,39	79.340.589	100,00
2002	16.470.078	19,98	15.054.986	18,27	5.851.946	7,10	50.891.493	61,75	325.916	0,40	82.416.557	100,00
2003	16.721.173	19,96	15.206.520	18,15	5.652.633	6,75	51.842.368	61,89	306.639	0,37	83.770.062	100,00
2004	17.920.462	20,38	16.203.447	18,43	5.862.069	6,67	53.818.561	61,20	305.496	0,35	87.942.470	100,00
2005	18.041.964	19,93	17.251.808	19,05	6.135.556	6,78	55.245.054	61,02	304.000	0,34	90.538.826	100,00
2006	17.480.891	18,79	17.347.734	18,64	6.201.572	6,66	58.221.171	62,57	327.586	0,35	93.049.796	100,00
2007	16.748.183	17,71	18.118.878	19,16	6.514.359	6,89	59.684.632	63,12	346.023	0,37	94.551.694	100,00
2008	16.282.265	17,01	18.817.468	19,66	6.833.562	7,14	60.620.463	63,33	333.442	0,35	95.720.196	100,00
2009	15.796.871	16,36	19.082.524	19,76	7.229.909	7,49	61.679.778	63,88	320.951	0,33	96.559.173	100,00
2010	15.480.934	15,78	20.415.330	20,81	7.844.451	8,00	62.219.954	63,41	344.380	0,35	98.116.218	100,00
2011	14.378.446	14,44	20.888.896	20,98	8.099.182	8,13	64.292.815	64,58	345.303	0,35	99.560.157	100,00
2012	13.432.939	13,31	21.550.031	21,35	8.578.192	8,50	65.977.298	65,35	369.952	0,37	100.960.268	100,00
2013	13.448.116	13,12	21.991.881	21,45	8.808.155	8,59	67.097.401	65,44	391.661	0,38	102.537.398	100,00
2014	14.169.748	13,43	22.051.802	20,91	9.149.114	8,67	69.251.128	65,66	404.926	0,38	105.472.678	100,00

Fig. 17: Empregos na indústria se mantém estáveis no período em que os empregos no campo declinam. Fonte: IBGE, 2014

(...) a partir do final dos anos 1980, o processo de reestruturação competitiva da indústria da construção civil fez com que alguns empreendedores atentassem para a importância da coordenação de projetos, em função das suas atividades de consolidação e integração dos projetos, como forma de aumentar sua competitividade empresarial em um mercado cada vez mais disputado (MANSO; MIDITIERI, 2011, p.13).

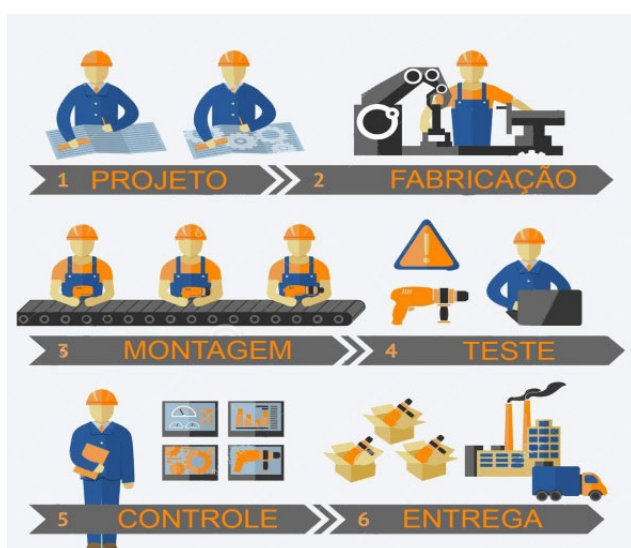


Figs. 18 e 19: Construção tradicional (artesanal), à esquerda e a feita em concreto com impressora 3D de grande porte, à direita: mundos distintos para a mesma finalidade. Fontes: <http://equipedeobra17.pini.com.br/construcao-reforma/49/de-onde-vem-a-madeira-entenda-o-processo-productivo-261012-1.aspx>; [https://www.huffpostbrasil.com/entry/3d-printing-buildings-china-winsun\\_n\\_7071610?ec\\_carp=797630161467429818](https://www.huffpostbrasil.com/entry/3d-printing-buildings-china-winsun_n_7071610?ec_carp=797630161467429818);

O caráter distinto da construção civil em relação à indústria de manufatura é um dos fatores responsáveis pelo desalinhamento nos processos entre elas. Pode-se citar como exemplos:

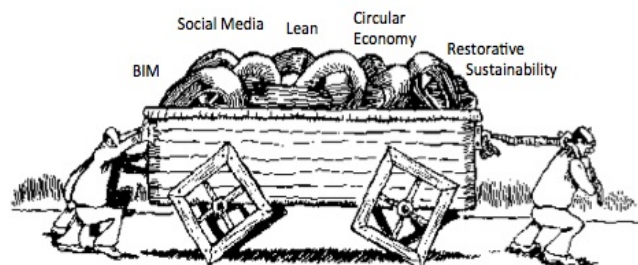
- Obras de engenharia possuem endereço próprio: cada construção se localiza em um local diferente, com particularidades como tipo de solo, orientação, legislação, vizinhança, acesso e infraestrutura local.
- Os projetos de arquitetura e engenharia são únicos: apesar da possibilidade de padronização dos projetos de arquitetura, o local e a orientação da implantação implicam diretamente no desempenho da edificação com relação ao conforto térmico, segurança e durabilidade. Mesmo nos casos onde são executadas edificações de um único modelo, como os conjuntos habitacionais populares, o caráter único deve ser considerado como válido.
- Da mesma forma como ocorre na fabricação de grandes equipamentos, como navios e algumas aeronaves, o porte de uma obra de construção civil demanda uma quantidade considerável de tempo, insumos, mão de obra, e verba.

- O ambiente interno de uma indústria, permite controlar fatores climáticos, ambientais e operacionais de maneira mais eficiente quando comparado com o ambiente de uma obra de construção civil.
- Na fabricação de bens de menor porte, como carros, produtos eletrônicos, alimentos e indústria têxtil, percebe-se o uso intensivo de ferramentas de automação e fabricação digital. Isso possibilita aperfeiçoar os processos e tornar a fabricação mais previsível e eficiente.



## Improving Construction

is a monumental challenge  
but we have new tools – we just need to use them!



@fairsnape

Image: <http://www.squarewheels.com/>

Figs. 20 e 21: O ambiente controlado, consolidado dentro das fábricas, o conservadorismo na construção civil e a dificuldade em conseguir um alinhamento entre os dois setores industriais.

Fontes: <https://pt.depositphotos.com/45240809/stock-illustration-factory-production-process-infographic.html>; <https://thebimhub.com/2014/11/13/six-reasons-why-construction-needs-to-embrace-bim/>;

Do ponto de vista do consumidor, existe uma preferência quase unânime pelo uso do concreto armado e alvenaria para as construções residenciais. Essa característica pode ser explicada em parte pela tradição do Brasil no uso do concreto, que é o material de construção mais consumido no mundo. Construir em concreto armado e alvenaria requer pouca qualificação, fazendo do Brasil um terreno fértil para este tipo de mão de obra. Trata-se de um material amplamente disponível, de fácil manuseio e grande durabilidade, que executado de maneira correta permite uma boa margem de segurança diante de possíveis imprecisões cometidas na execução.



Figs. 25 e 26: O concreto armado, material de construção mais consumido no mundo, permanece no inconsciente coletivo como seguro e confiável, permitindo “sustentar” construções ousadas. Na imagem da direita, temos uma construção irregular em Maceió com sete pavimentos. Fonte: o autor

Assim, construções imprudentes do ponto de vista técnicas e normativas, que extrapolam os limites considerados seguros, se mantêm íntegras devido ao coeficiente de segurança do material, permitindo a construção de “puxadinhos” de vários andares. Desta forma o concreto armado se estabeleceu no imaginário das pessoas como um material confiável e resistente. Isso explica parcialmente a resistência do consumidor diante de edificações feitas com materiais diferentes como paredes de painéis estruturados tipo *steelframe*, *drywall* e estruturas metálicas para uso residencial. Tais aspectos comprometem a formação de mão de obra para tipos de construção diferentes dos tradicionalmente utilizados.

As etapas de uma obra de construção civil empregam operários com diferentes especialidades. Algumas não requerem experiência prévia, sendo consideradas de baixa complexidade, como as funções de servente de pedreiro e auxiliar de limpeza, por exemplo. Muitos desses ofícios são exercidos por pessoas com baixa, ou nenhuma escolaridade, tornando o ambiente da construção civil uma opção atrativa para uma grande massa de pessoas sem a qualificação necessária para ler procedimentos, fazer cálculos e operar algumas máquinas de funcionamento complexo. Há também as funções compartilhadas, permitindo que um pedreiro seja capaz de executar serviços de especialidades diferentes como instalações hidráulica, elétrica de baixa tensão e também pintura. Essa aparente versatilidade operacional é mais um fator que mantém o setor da construção civil vinculado aos processos artesanais, criando vícios operacionais, aumento de erros, desperdícios e desvios na qualidade desejada, prejudicando a gestão de projetos. A indústria de

manufatura, por outro lado, funciona predominantemente em um ambiente controlado, utilizando processos que requerem uma maior especialização individual e percepção de trabalho setorizado de equipe, fato que favorece o planejamento e o controle de qualidade do produto final.



Figs. 22 e 23: O “faz tudo”, comum nas obras de engenharia. Linha de produção da Embraer; Funções bem definidas. Fontes: <https://www.sr-faztudo.com.br/sobre>; [https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKewjp14zt\\_argAhWz17kGHb19Bz4Qjxx6BAgBEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.seuplaneta.com.br%2F5-Campos%2F2013%2F04%2Fembraer-desiste-de-fazer-helicopteros.html&psig=AOvVaw1JF6XeNV97KsOF\\_I4YxOtD&ust=1549675582534127](https://www.google.com/url?sa=i&source=images&cd=&ved=2ahUKewjp14zt_argAhWz17kGHb19Bz4Qjxx6BAgBEAI&url=http%3A%2F%2Fwww.seuplaneta.com.br%2F5-Campos%2F2013%2F04%2Fembraer-desiste-de-fazer-helicopteros.html&psig=AOvVaw1JF6XeNV97KsOF_I4YxOtD&ust=1549675582534127);

Outro ponto que implica no conservadorismo da indústria da construção tem sido a dificuldade do mercado para absorver profissionais com nível superior. Percebe-se uma oferta maior para formação de profissionais com nível superior do que para cursos técnicos. Cria-se então uma situação com muitos profissionais desqualificados, aptos para serviços braçais, muitos profissionais com nível superior, desempregados e poucos profissionais com nível técnico, ideais para exercer tanto funções de esforço moderado, quanto as que exijam qualificação específica, porém, com um salário menor que o exigido em nível superior.

Aqueles que ambicionam uma condição de vida melhor do que aquela oferecida pelos seus pais buscam carreiras de trabalho essencialmente intelectual. Porém, o encolhimento do mercado de trabalho e o aumento considerável no número de faculdades, criaram um excedente de profissionais que se deparam com grande concorrência e remunerações baixas. Esse cenário ajuda a manter a evidente disparidade entre a indústria de manufatura e a da construção civil. Em países mais desenvolvidos, como Estados Unidos, Canadá, França e Alemanha, onde o preço do serviço é mais valorizado e bem remunerados, ofícios que necessitam do uso do trabalho braçal são bem vistos pela sociedade. No Brasil,

pode-se considerar que a presença mais acentuada do uso da tecnologia, especialmente a que envolve a fabricação digital permitirá essa mudança de paradigma.



Figs. 27 e 28: O Brasil e o déficit de mão de obra com qualificação técnica; gargalo para o desenvolvimento. Fonte: <https://www1.sfipec.org.br/fiec-noticias/101091/senai-sobral-esta-inscricoes-abertas-para-selecao-de-curso-tecnico-em-eletronicas>;

## 1.2. Pré-fabricação e pré-montagem

J.B. Gardiner classifica a fabricação fora do canteiro com os conceitos de pré-fabricação e pré-montagem. “Nesse processo de industrialização estão envolvidos o design e manufatura de unidades ou módulos, usualmente fora do local da obra.” (GARDINER, 2011, p. 162). Nesse sentido, pré-fabricação consiste na ação de montagem de várias partes para criar um componente que será instalado como parte de um sistema. Já a pré-montagem é um processo que associa vários componentes e equipamentos na elaboração de um sistema. Ainda segundo Gardiner, a fabricação fora do canteiro de obras possui uma variedade de termos. Eles são denominados de acordo com o nível de composição e elementos agregados. Construção modular e pré-fabricação volumétrica e não volumétrica, são exemplos desses níveis de composição de cada produto (GARDINER, 2011, p. 162).

Ainda complementando o conceito de pré-fabricação defendido por Gardiner, o uso de elementos construtivos tradicionalmente utilizados e aprovados pelas normativas vigentes como telhas de grande formato, painéis de alumínio composto e revestimentos cerâmicos, dentre outros, quando considerados de forma isolada não configuram pré-fabricação. Esta depende da ação de arranjo sistemático em ambiente industrial visando controle de qualidade, redução de custo, tempo e

necessidade de mão de obra (GARDINER,p. 166). Temos exemplos de pré-fabricação em elementos como portas e janelas prontas, bem como bancadas de cozinha completas, com pia, armário e torneira.



Figs. 24: Pré-fabricação de parede composta por dois painéis. Fonte <https://www.youtube.com/watch?v=OybHpEYULTQ;>

Exemplos de pré-montagem na arquitetura, são mais comuns nos países onde o custo da mão de obra é mais elevado. No Brasil, o uso de elementos pré-fabricados na construção civil, ainda é pouco expressivo, quando comparado com os métodos tradicionais, (ver figura 6 na pág. 18). Esta tendência deve se manter enquanto o custo do serviço continuar permitindo margem de lucro superior para os construtores que empregam esse tipo de mão de obra. O caráter conservador observado na indústria da construção civil implica em diversas limitações. Algumas dessas barreiras, que mantêm características mercadológicas e estéticas das edificações, tornam o campo de ação da indústria da construção um tanto restrito. Diante dessas limitações, o setor inova pouco e repete muito. Como resultado verifica-se uma grande incidência de prédios e casas que utilizam o mesmo projeto, a mesma mão de obra desqualificada e as mesmas técnicas artesanais. Poucas obras contam com a presença de gerentes de projeto e um planejamento eficiente, apoiado em técnicas modernas. É certo que não se pode generalizar. Há um esforço, principalmente feito por muitas construtoras de edifícios residenciais, em

aperfeiçoar processos, conquistar certificações e incluir ao máximo toda tecnologia que for possível.

### 1.3. A evolução das tecnologias CAD/CAM

A relação entre a produção da arquitetura sem o uso de fabricação digital e sua representação gráfica, segue um padrão de reciprocidade, fazendo com que possibilidades construtivas se limitem aos modos de representação. Da mesma forma, os modos de representação gráfica encontram limitações nos casos de formas mais complexas (IWAMOTO, 2009 p.5). Com o surgimento das ferramentas digitais, que incluem programas de computador e máquinas controladas numericamente, as possibilidades formais e conceituais foram ampliadas. A chamada “era da informação”, tal como a era industrial que a precede, alterou a maneira como se projeta e se constrói (KOLAREVIC, 2001 p.1). Essa abordagem de produção conhecida como fabricação digital e *file to factory*, transfere a informação do arquivo digital diretamente para o maquinário, suprimindo a necessidade de desenho técnico e interpretação humana.

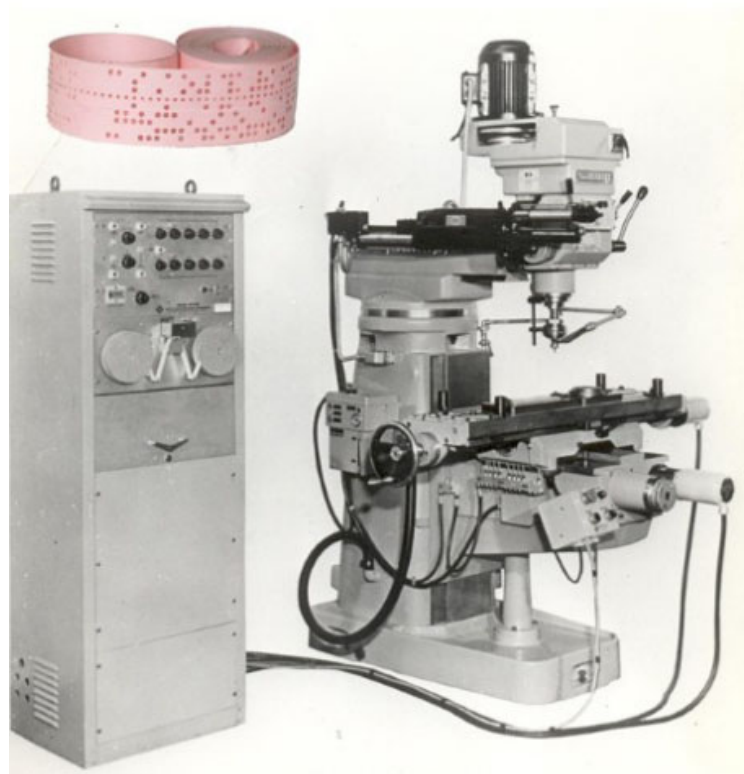


Fig. 25: primeiras máquinas de código numérico NC. Fonte: <http://www.proptimus.com.br/maquinas-cnc-historia-comando-numerico-computadorizado/>

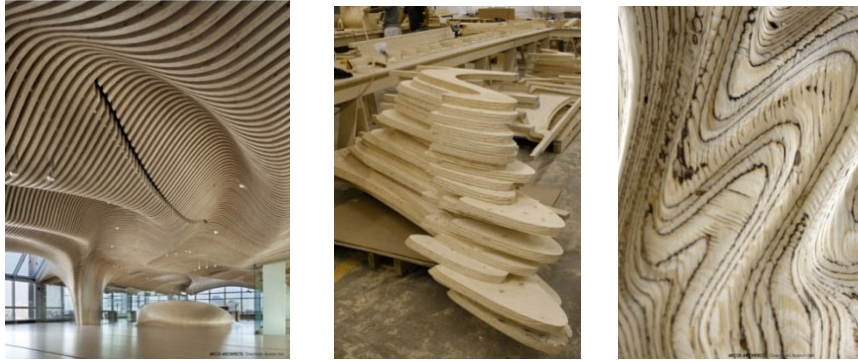


A emergência da terceira revolução industrial, marcada pela automatização dos processos a partir dos anos 1940 comprova que controlar máquinas digitalmente não é algo novo. A tecnologia CAD/CAM tem sido amplamente utilizada na indústria e engenharia de manufatura, especialmente a automotiva, naval e aeroespacial por mais de meio século. Porém, nas últimas décadas, houve um aumento da disponibilidade e redução de custos dos equipamentos CNC, impactando positivamente no setor da construção civil, especialmente na prática de projeto, ajudando a expandir o campo de atuação do arquiteto (FONSECA DE CAMPOS, 2017 p. 22).

A facilidade de acesso e a popularização das ferramentas digitais tornou o processo de projeto atual dependente do uso dos programas de computador. Estes, por sua vez, evoluíram para atender a especificidades dos projetos. Assim, é possível contar com ferramentas como, algoritmos generativos para estudo da forma, sistemas de modulação automática, análise estrutural, análise térmica, simulação de fluidos, gerenciamento de projetos, coordenação de obras, entre outras. A fabricação digital costuma ser utilizada nos estágios iniciais, como a impressão 3D em concreto e nos estágios finais, como os projetos de mobiliário e interiores. Este processo racionalizado, apesar de possuir certo nível de automatização, necessita de mão de obra especializada com diversos níveis de especialização e sua operação elimina diversos processos intermediários entre o projeto e a produção final.



Figs. 26-28: O uso de impressão 3D em concreto pela empresa chinesa Winsun. Fabricação digital utilizada no estágio inicial de uma obra. Fonte: <https://www.archdaily.com/497836/chinese-firm-3d-prints-10-homes-in-24-hours>; <https://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html>;



Figs. 29-31: “One main”, interior de escritório executado com corte CNC de peças de madeira. Fonte: <http://www.decoi-architects.org/2011/10/onemain/>

Apesar desta mudança percebida na transição das pranchetas para os monitores, pouco se fez sentir nos projetos. Especialmente no Brasil, o ambiente da construção civil mantém características conservadoras que se refletem nas técnicas construtivas e nos projetos. Assim, uso das tecnologias para desenho digital implica, na maior parte dos casos, apenas como um recurso facilitador para a elaboração do mesmo tipo de projeto que se repete década após década. O desenho CAD substituiu os projetos feitos na prancheta, porém os edifícios continuaram praticamente iguais e construídos da mesma maneira.

Já em uma abordagem baseada na fabricação digital utilizam-se os dados contidos na modelagem tridimensional para alimentar a operação das máquinas. Esta combinação possibilita expandir o repertório tradicional e a antiga relação que estabelecia limites de reciprocidade entre o desenho, forma e construção:

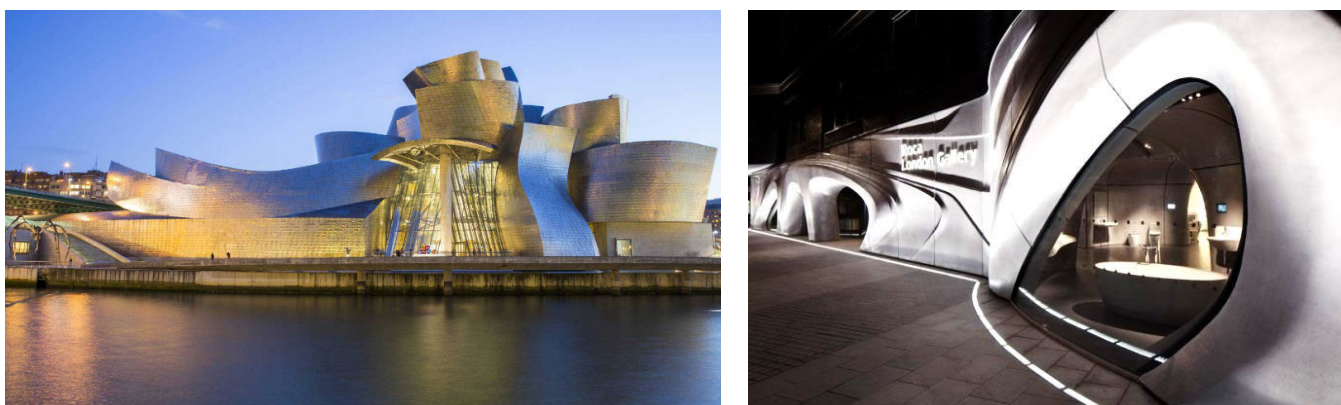
(...) No entanto, tal como todo processo de projeto, existe, invariavelmente, áreas inexploradas entre as várias modalidades de fabricação digital. Considerando que os diversos tipos de ferramentas e técnicas disponíveis possuem suas próprias restrições e particularidades. No melhor dos casos, como os mostrados neste livro, a inovação nasce da ruptura das limitações e dos avanços no design. (IWAMOTO, 2009, p.4)

A popularização do uso e a evolução das ferramentas digitais também permitiu a fabricação de modelos cada vez mais complexos, utilizando materiais, formas e métodos construtivos não convencionais. Isso possibilitou inserir o processo de concepção e produção da arquitetura em um ambiente mais colaborativo, onde participam profissionais de diferentes áreas e lugares em um mesmo projeto. Essa abordagem digital estabeleceu novos caminhos para o ensino e prática da arquitetura. O pensar e o fazer, o desenho e a fabricação, a prototipagem e o produto final se fundiram, tornando se interativos. Tal como

aconteceu com arquitetos como Frank Gehry, Zaha Hadid e Jean Nouvel, o ambiente digital permitiu um controle sobre o processo de produção da edificação, que independentemente do porte, podiam ser decompostas, numeradas e quantificadas e fabricadas automaticamente. Ao observar obras projetadas pelos arquitetos citados, percebe-se que, graças às possibilidades oferecidas pela fabricação digital, as edificações possuem formas e materiais sem precedentes.



Figs. 32 e 33: A construção da casa opensource Wikihouse pelo LAMO3D – FAU UFRJ. Fonte: <https://www.archdaily.com.br/br/773676/casa-revista-a-primeira-casa-fabricada-digitalmente-no-brasil>;



Figs. 34 e 35: Dois exemplos de projetos que utilizaram fabricação digital: à esquerda, o museu Guggenheim, em Bilbao, na Espanha, projetado por Frank Gehry e à direita, a galeria Rocca London, em Londres, Inglaterra, projetado por Zaha Hadid. Fonte: <https://www.saba.es/pt/estacionamento-museu-guggenheim>; <https://www.archdaily.com/179092/rocca-london-gallery-zaha-hadid-architects>;

Para tornar possível a transição do arquivo digital para a construção física, é necessário traduzir informação digital gráfica, seja dos modelos tridimensionais ou dos desenhos em duas dimensões para uma linguagem que as máquinas CNC (*computer numeric control*) possam entender. Tal fato requer que os arquitetos

tenham que adquirir novas habilidades. Algumas dessas operações de tradução de linguagem são automáticas, necessitando apenas de alguns ajustes nos parâmetros dos programas específicos das próprias máquinas. Outras necessitam a compreensão de linguagens de programação C++, *wiring*, *java* ou o código simplificado *sketch*, no caso de plataformas de computação física populares como o *Arduíno*.

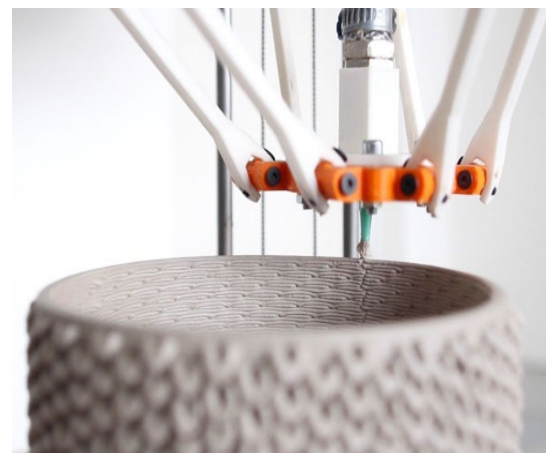
(...) O laboratório de mídia do Massachusetts Institute of Technology (MIT), investiu anos de pesquisa em luvas digitais e telas táteis, além de sistemas de *feedback* controlados por câmeras e lasers, para unir a modelagem física e digital. Mesmo assim, a mediação da máquina e de seu software não será abolida. (IWAMOTO, 2009, p.4)

Evidencia-se desta maneira uma mudança no perfil do profissional de arquitetura. O contato com a abordagem de projeto e produção baseada na fabricação digital aproxima o arquiteto da execução e da necessidade de compreender, aspectos muitas vezes terceirizados para engenheiros. Isso, porém não exclui a necessidade da participação de profissionais de disciplinas distintas uma vez que os princípios inerentes à fabricação digital se estendem a todos os envolvidos.

```
int led = 13;

void setup() {
  pinMode(led, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(led, HIGH);
  delay(1000);
  digitalWrite(led, LOW);
  delay(1000);
}
```



Figs. 36-38: Exemplo de código de programação para a placa de Arduíno. Essa placa permite controlar máquinas de fabricação digital. Fonte:

<https://br.pinterest.com/pin/575405289864712893/?lp=true>;



Fig. 39: Centre Pompidou, em Metz, França. Projetado utilizando algoritmos de parametrização generativa e fabricado digitalmente. Obra resultante de concurso internacional de projeto em 2003. Vencedores: Shigeru Ban Architects and Jean de Gastines Architectes, with Philip Gumuchdjian Architects. Fonte: <http://www.jdg-architectes.com/projet/centre-pompidou-metz/?lang=en>;

#### 1.4. Design para manufatura e montagem de bens de consumo

Proveniente do ambiente industrial, o conceito de desenho para manufatura, *Design for Manufacture (DFM)*, surge como ferramenta metodológica para tornar o processo de fabricação mais eficiente. O principal objetivo do DFM é reduzir os custos de produção das peças com a solução de problemas em potencial ainda na fase de projeto. Assim, a fabricação de elementos que atendam as especificações de qualidade, utilizando a menor quantidade de insumos é permitida.

Semelhante ao DFM, o desenho para montagem, ou (DFA), tradução de *Design for Assembly*, cuida do gerenciamento da montagem das peças produzidas, buscando reduzir o custo de fabricação. Dentre os princípios do DFA, alguns se baseiam em reduzir a quantidade de peças, sinalizar ordem e sequência de montagem com símbolos, padronizar as peças, explorar a criação de módulos e de peças “base” para facilitar a locação de outros componentes. Por se tratarem de técnicas semelhantes e interdependentes, ambas as técnicas (DFM) e (DFA), costumam ser referenciadas com o termo Desenho para Manufatura e Montagem, ou simplesmente DFMA. “Quando o DFA começou a ser levado à sério no início dos anos 80, com a obtenção de resultados, ficou evidente que tiveram maiores ganhos os produtos com maior simplificação pela redução na quantidade de peças” (BOOTHROYD, 2002, p.9).

A relação de interdependência entre os processos de desenho para manufatura e montagem requer uma comunicação estreita entre os projetistas das duas áreas até que o produto esteja bem resolvido tecnicamente. Assim, uma vez definido o protótipo do produto (DFM), ele segue os seguintes passos (DFA):

1. Nesta etapa, são listadas, numeradas e estabelecidas relações entre as partes do produto, permitindo identificar as primeiras oportunidades para reformulação do projeto. O produto é simplificado ao seu estado puramente funcional a fim de serem indicadas suas partes mais importantes. Buscam-se os itens padronizáveis e estimam-se os custos para a montagem do produto nos estados puramente funcional e completo.
2. Nesta etapa é feita prova de erro de montagem, avaliando as consequências em caso de montagem errada ou montagem com partes faltando.
3. Nesta etapa é feita uma simulação de uso do produto no sentido de aferir o comportamento de suas partes após a montagem completa. Em muitos casos, esta verificação é feita em protótipos totalmente funcionais.
4. Analisar todas as informações para uma nova versão do projeto. (aprimoramento contínuo)

A quantidade de etapas em um processo de Desenho para Montagem depende do tipo de produto analisado. A primeira etapa, onde ocorre uma simplificação do produto é considerada a mais importante (parte base). Geralmente partes líquidas não são incluídas no processo de desenho para montagem.



Figs. 40 - 42: Dois produtos diferentes com a mesma função, sendo que o da esquerda possui apenas duas partes e o da direita, 10 partes. Fonte: <https://www.datasupriweb.com.br/extrator-grampo-espatula-niquelado-cavia-ca-112/p>; <https://pt.wikihow.com/Remover-Grampso>;

## 1.5. Design para Manufatura em impressão 3D em concreto

Tal como acontece no desenho para manufatura de produtos, o projeto para construção por extrusão em concreto também possui suas especificidades. O sucesso da impressão 3D em concreto depende primeiramente do uso de um modelo 3D íntegro, sem defeitos que possam ser transmitidos para o modelo. O modelo 3D não deve ter faces invertidas, buracos, por falta de alguns triângulos que formam sua superfície, nem vértices desconectados. Antes de utilizar o arquivo é necessário validar o modelo 3D em busca de erros. Alguns programas como o Autodesk Meshmixer permitem corrigir possíveis defeitos. Porém, ações de correção automática utilizando um software diferente do originalmente utilizado costumam modificar a integridade da malha. Nesse sentido, se recomenda utilizar um modelo cuja integridade não dependa de operações secundárias de correção.

A construção aditiva em concreto pode acontecer de maneiras diferentes, conforme será detalhado no capítulo 3, submetendo o desenho para manufatura em 3DCP às limitações do maquinário, tipo de material, escala e a necessidade ou não de transporte. Uma das limitações mais comuns quando se projeta para impressão de material pastoso se refere à necessidade de manter as camadas sobrepostas em 2.5D, evitando ao máximo a ocorrência de desalinhamento na horizontal. Pequenos desvios são possíveis especialmente quando camadas mais finas são criadas, a exemplo da TotalKustom e da 3DP (Loughborough). Outras abordagens como a XtreeE (França), tiram partido de um braço robótico de 6 eixos e camadas de 1,2 cm de espessura, que permite imprimir formas com inclinações mais acentuadas.

Outro ponto importante que deve ser considerado é a resolução da impressão. Impressoras 3D para construção costumam ter pouca resolução para contemplar a construção de objetos grandes em pouco tempo (GARDINER, p.123, 2011). A extrusão de concreto fresco impossibilita a criação de quinas. Ângulos mais agudos dependerão da diminuição da área de saída do extrusor, acarretando no aumento do tempo de impressão. Outras questões se referem à fabricação de peças que necessitem de transporte. Os componentes deverão resistir a esforços importantes no momento em que forem içados para transporte e montagem sendo necessária a previsão de reforços estruturais em aço (BUSWELL, et al., pag 43, 2018).

## 1.6. Tipos de manufatura no contexto da fabricação digital.

### a) Manufatura aditiva: impressão 3D

Baseada na sobreposição de camadas, formando o objeto.

### b) Manufatura subtrativa: corte CNC por router, laser, torno, etc.

Baseada na retirada de material de forma seletiva

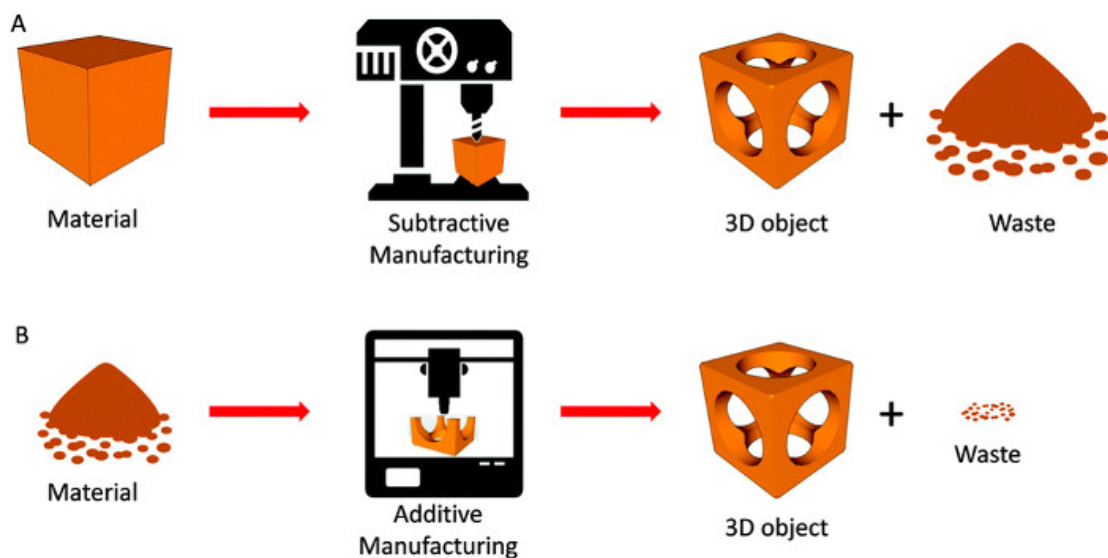


Fig. 43: comparaqtivo entre manufatura aditiva e subtrativa. Fonte: <https://www.bct-technology.com/en/support/tips-tricks/nx-1102-additive-manufacturing.html>

### c) Manufatura formativa: dobras, forjas, moldes e prensas

Baseada no uso de moldes para formar o objeto.

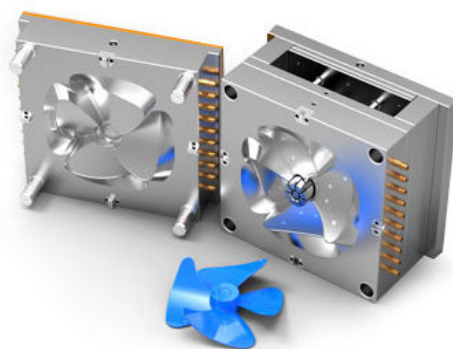


Fig. 44: Objeto fabricado por injeção plástica em molde de alumínio. Fonte: [https://esmesm.manufacturer\\_globalsources.com/si/6008834678057/pdtl/Injection-mold/1128297303/Plastic-injection-molding.htm](https://esmesm.manufacturer_globalsources.com/si/6008834678057/pdtl/Injection-mold/1128297303/Plastic-injection-molding.htm);





## CAPÍTULO 2

## CAP. 2: IMPRESSÃO 3D NO CONTEXTO DA FABRICAÇÃO DIGITAL

### 2.1. Entendendo a impressão 3D

No âmbito da fabricação digital, a impressão 3D é considerada como "um raro exemplo de uma tecnologia única que se tornou verdadeiramente disruptiva por si só" (PRENTICE, 2014), revolucionando, em um só tempo, as indústrias manufatureira, automotiva, aeroespacial e oferecendo possibilidades inovadoras também em várias áreas, tais como a medicina e odontologia. A impressão 3D se enquadra na modalidade de fabricação conhecida como de manufatura aditiva, onde a materialização dos objetos se baseia na sobreposição de sucessivas camadas controladas por computador.

Esse processo se assemelha ao utilizado na impressão sobre papel feita por impressoras baseadas em jato de tinta. Na impressão 3D, porém, cada camada possui uma espessura pré-determinada, geralmente em milímetros ou fração de milímetros fazendo com que o objeto seja formado como resultado dessa sobreposição. Tal característica de fabricação, por camadas, sustenta seu caráter inovador, uma vez que a manufatura aditiva dispensa o uso de moldes feitos por subtração de material permitindo fabricar geometrias impossíveis por outras técnicas. As possibilidades da impressão 3D, inicialmente limitadas, evoluíram gradativamente em termos de escala tipos de material.

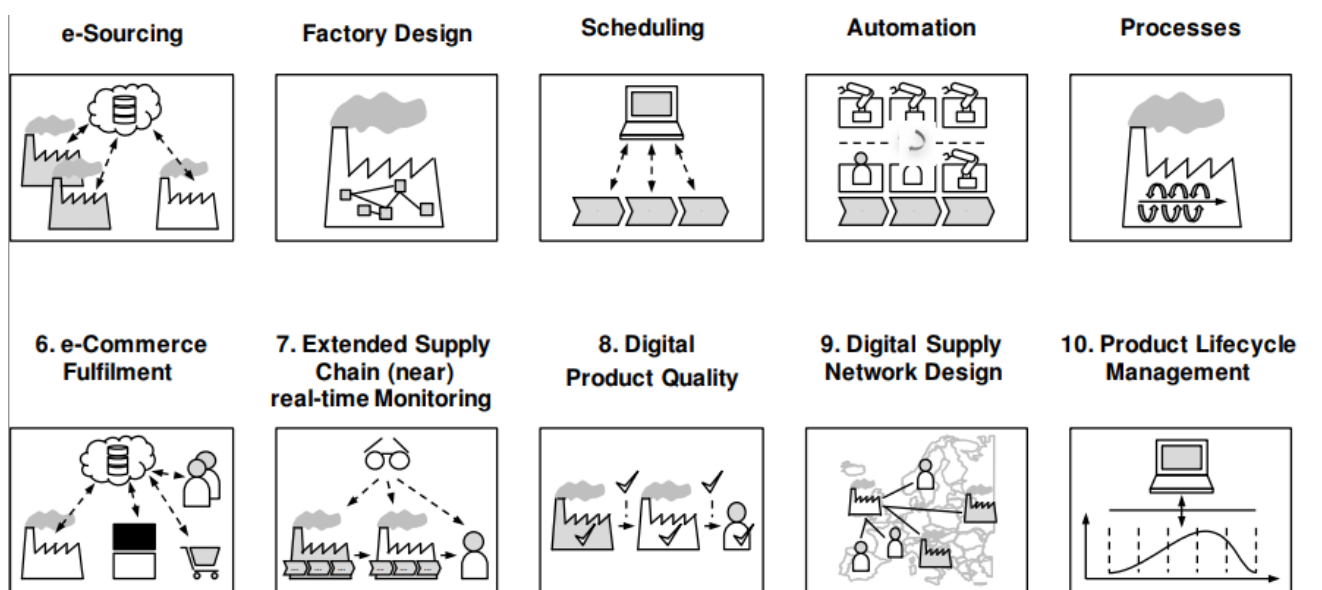


Fig. 45: fonte: <https://www.ifm.eng.cam.ac.uk/news/transforming-supply-chains-through-digitalisation/>

Tal particularidade fez com que seu uso fosse estendido para além da prototipagem rápida, permitindo a adoção de materiais de diferentes propriedades físicas como resistência, cor, transparência, etc. Assim, a impressão 3D passou a se integrar também à fabricação do produto final para o consumidor. De acordo com o centro para manufatura internacional IFM, foram identificados dez cenários em que a manufatura aditiva pode ser adotada pela cadeia produtiva (fig. 45).

## **2.2. Surgimento e evolução da impressão 3D**

### **2.2.1. Estereolitografia (SLA)**

Entre os anos de 1980 e 1989, houve um intenso esforço em pesquisa e desenvolvimento que resultou na criação das principais tecnologias de impressão 3D utilizadas até hoje. A primeira iniciativa referente ao que se conhece como impressão 3D foi descrita pelo Dr. Hideo Kodama, do Instituto Municipal de Pesquisa de Nagoya, Japão. O registro de patente dessa técnica, depositado pelo Dr. Kodama, em 1980 descreve um sistema de prototipagem rápida baseado na cura de resina por raios ultravioleta, cuja sobreposição de camadas resultaria na materialização tridimensional do objeto modelado em software. Para dar suporte ao invento, Kodama produziu dois importantes artigos que descrevem as bases das modalidades SLA (*stereolithografia*) e SLS (*selective layer sintering*). Ainda assim, por motivo de falta de verba para concluir pesquisa, que acarretou na perda de prazo para preenchimento das especificações completas da patente depositada, Kodama perdeu o direito de proteção da sua invenção.

Entre 1984 e 1986, os cientistas franceses *Jean-Claude André*, *Alain le Méhauté* e *Olivier de Wiite*, criam a tecnologia de estereolitografia. Méhauté, jovem engenheiro da área de eletroquímica precisava criar um objeto para provar seus cálculos sobre pesquisa em geometria de fractais. O resultado desse cálculo deveria possibilitar a equivalência entre as propriedades locais e globais do modelo. Devido à complexidade geométrica requerida, a construção do objeto não seria possível através das técnicas de manufatura convencionais. Diante da especificidade dessa demanda, os três cientistas desenvolveram e patentearam a tecnologia conhecida como estereolitografia. A impressora 3D construída por eles chegou a produzir uma

pequena estrutura em espiral. Pouco tempo depois, devido a falta de financiamento, os pesquisadores perderam o interesse pelo projeto por não identificar aplicações comerciais para ele. Diante disso, resolveram descontinuar a pesquisa.

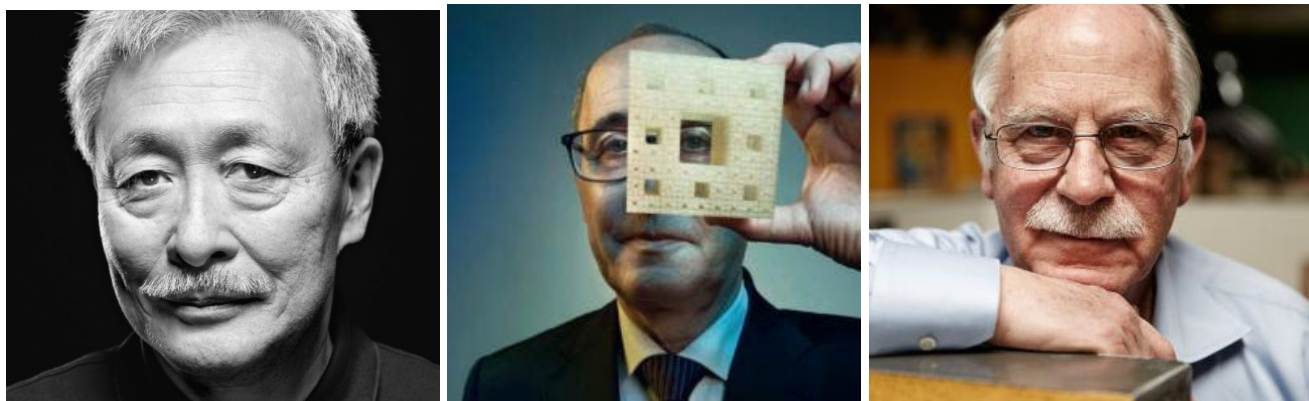


Fig. 46 – 48 Da esquerda para a direita: Dr. Hideo Kodama; Alain le Méhauté e Charles Hull. Fonte: <https://www.sculpteo.com/blog/2017/03/01/whos-behind-the-three-main-3d-printing-technologies/>;

Em 1983, o desenvolvedor norte americano Charles Hull, que trabalhava em uma empresa na produção de superfícies plásticas para mobiliário, utilizando luzes ultravioletas para catalisar resinas se frustrava ao perceber que produzir pequenas peças plástica para protótipos demorava meses. Diante disso, ele resolveu construir um dispositivo controlado por computador capaz de automatizar o processo artesanal de prototipagem. Hull teve à sua disposição um pequeno laboratório próprio que possibilitou a criação de seu aparato para produção de objetos tridimensionais por estereolitografia (SLA). Sua patente, depositada em 1984, começou a vigorar em 1986. Dois anos depois, Hull, ao contrário dos cientistas franceses, teve visão de mercado e co-fundou a primeira empresa a comercializar impressoras 3D do mundo, a 3D systems. Depois do surgimento da estereolitografia, outras modalidades de impressão 3D como a SLS (*selective layer sintering*) e FDM (*fused deposition modeling*) levaram a impressão 3D a um patamar mais alto, inserindo ainda mais a manufatura aditiva nas rotinas industriais.

A tecnologia SLS, cujo inventor foi o estudante universitário norte americano Carl Deckard, teve a primeira patente foi depositada em 1981. Consiste na sinterização por raio *laser* de material em pó de forma seletiva. Tirando partido de materiais como nylon, PA12, Alumínio, Carbonmide, PEBA, entre outros, a tecnologia SLS dispensa o uso de suportes para imprimir, conferindo maior qualidade de acabamento, dispensando pós-produção e permitindo a materialização

tanto de protótipos, quanto do produto final. Comparada a outras tecnologias de manufatura aditiva disponíveis, como a de modelagem por fusão de filamento FDM a SLS ainda é considerada de alto custo. Por outro lado, as peças produzidas por essa tecnologia geralmente são feitas em menos tempo, com maior qualidade e resistência que atende ao uso como produto final, quando comparadas com a técnica mais popular atualmente a FDM.

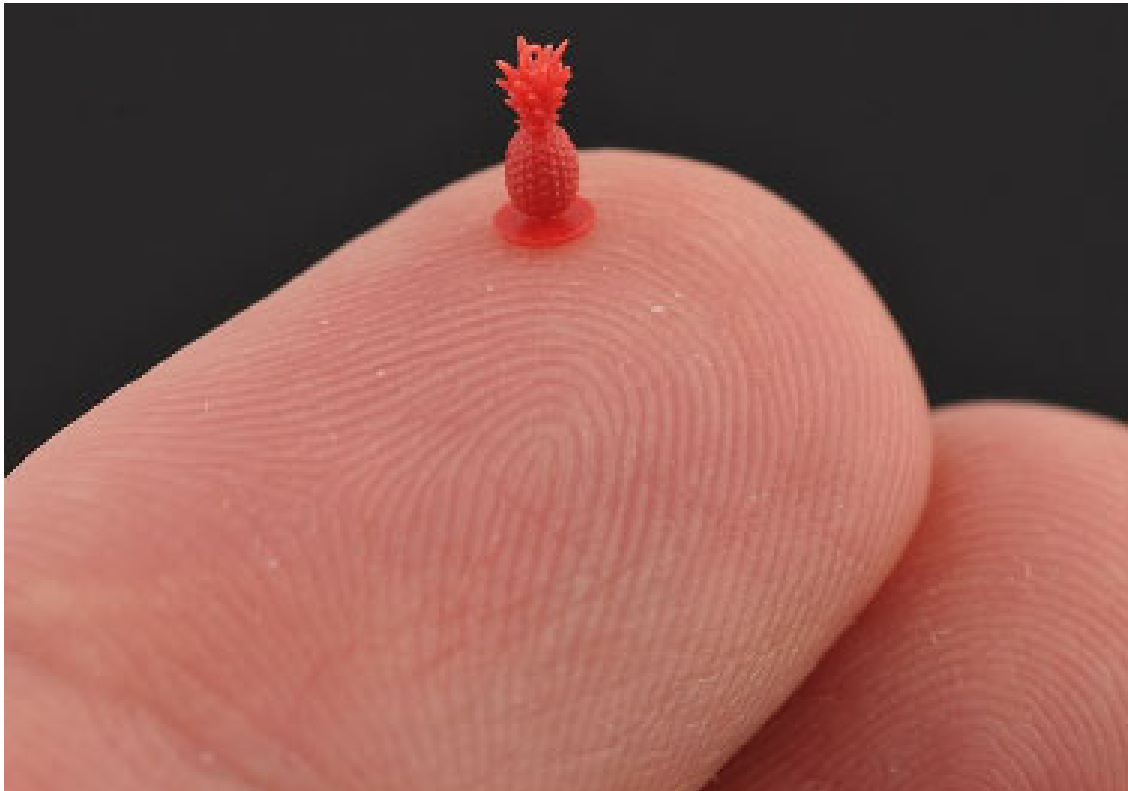


Fig. 49 – alta resolução da estereolitografia permite imprimir pequenos detalhes. Fonte: <https://3dprint.com/10913/3d-printed-miniatures/>

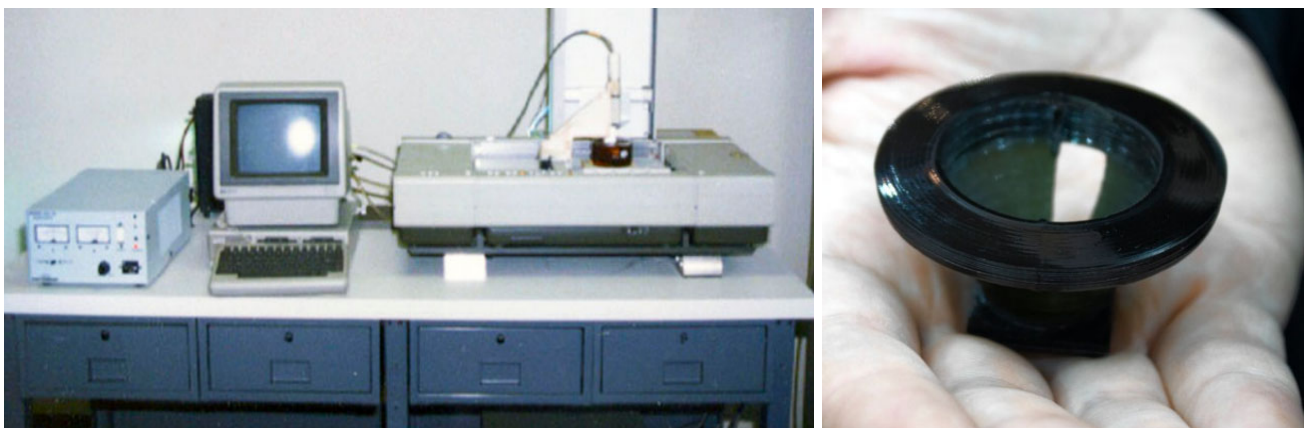


Fig. 50 e 51: Impressora 3D de Charles Hull e peça impressa. Fonte: <https://3dprint.com/72171/first-3d-printer-chuck-hull/>;

Segundo Charles Hull, a tecnologia de impressão 3D alcançaria seu ápice entre os anos de 2008 e 2018, quando o setor industrial fosse transformado, absorvendo a tecnologia de manufatura aditiva. Essa transformação vem sendo percebida como um fenômeno crescente, possibilitando a resolução de diversos problemas antes impensáveis, como a prototipagem rápida de objetos em três dimensões, estoque de peças em arquivos digitais e produção de peças com alta complexidade geométrica, impossíveis de serem feitas de outra maneira.

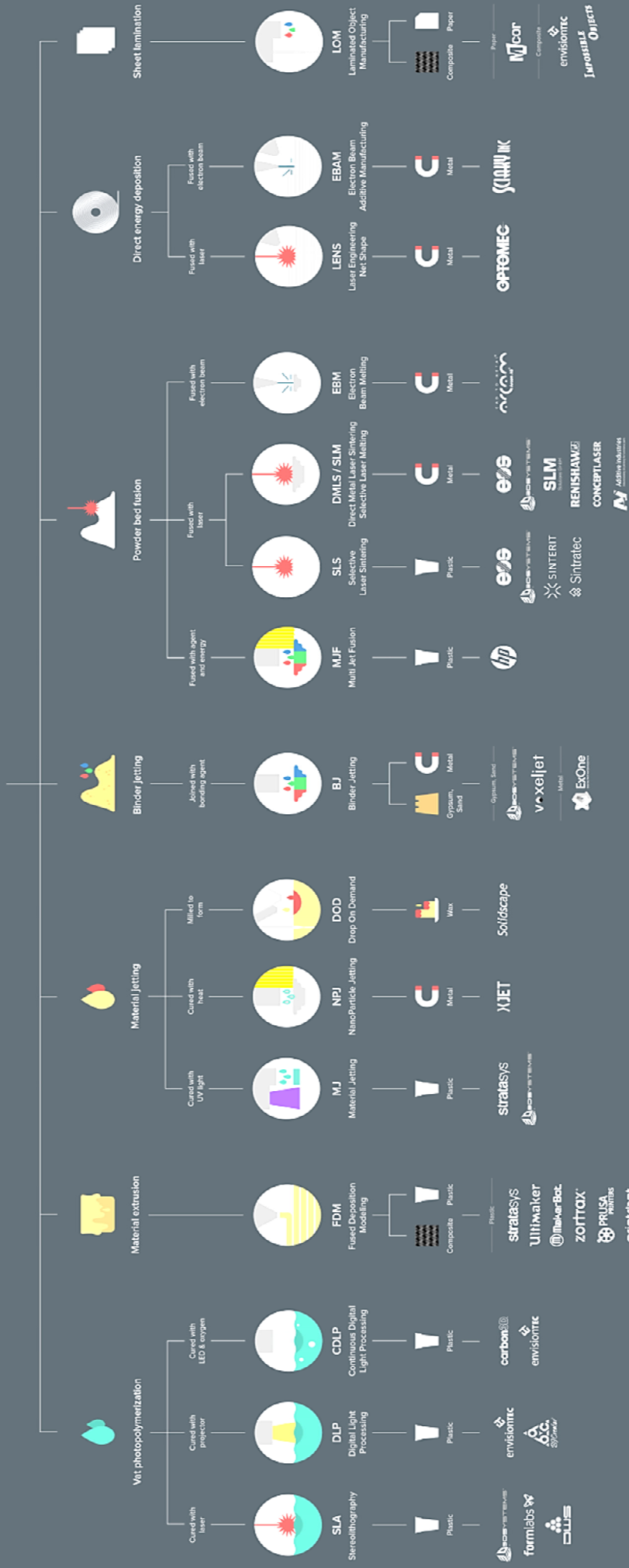
Após mais de duas décadas de amadurecimento, um grande repertório tecnológico foi desenvolvido. A impressão 3D precisava de padrões que dessem respaldo normativo para que seu uso pudesse ser introduzido na indústria. No sentido de agrupar em categorias as diferentes formas de manufatura aditiva, foi criada uma comissão técnica em 2009 pela ASTM (Sociedade Americana de testes e materiais). Em fevereiro de 2012, a ASTM publicou o resultado da comissão F42, com a norma ISO/ASTM52900-15, ordenando a manufatura aditiva em sete categorias.

Apesar da tradução para o português, as nomenclaturas são universalmente conhecidas pelos profissionais do meio em inglês. Para ilustrar de forma mais específica as categorias criadas pela ASTM, o site 3Dhubs.com, que oferece serviço de impressão 3D por encomenda, criou uma tabela<sup>3</sup> contendo as categorias e suas respectivas tecnologias e fabricantes:

---

<sup>3</sup> Fig. 5: Tecnologias de manufatura aditiva. Fonte: [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com)

# ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES



Find out more at [www.3dhubs.com/what-is-3d-printing](http://www.3dhubs.com/what-is-3d-printing)

### 2.2.2. Vat Polymerization (polimerização de resina)

Processo de manufatura aditiva no qual um líquido fotossensível em um recipiente é curado por exposição seletiva de raios ultravioleta.

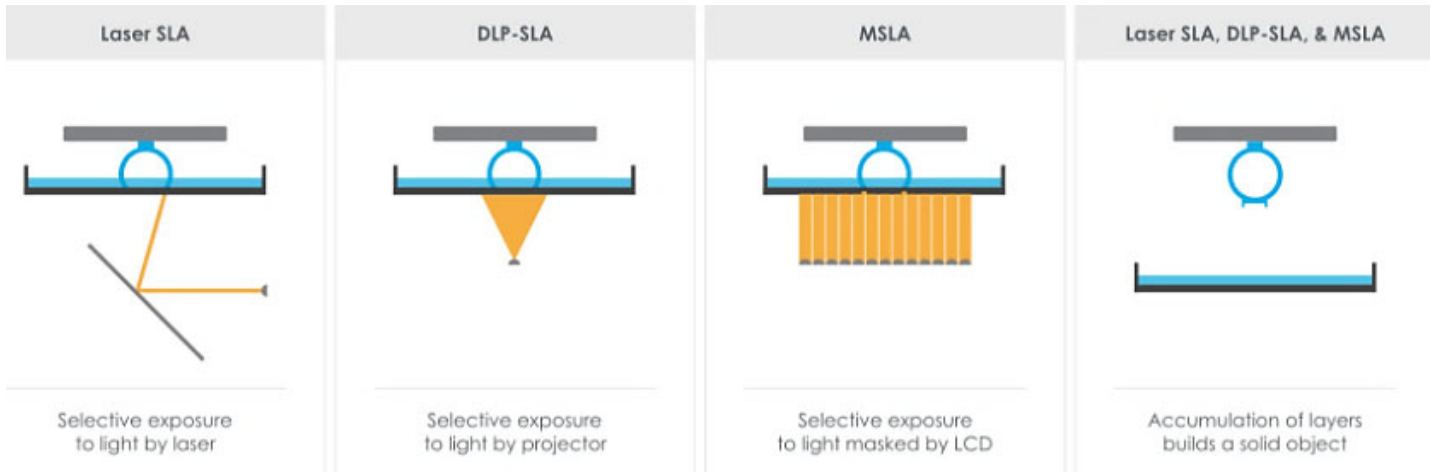
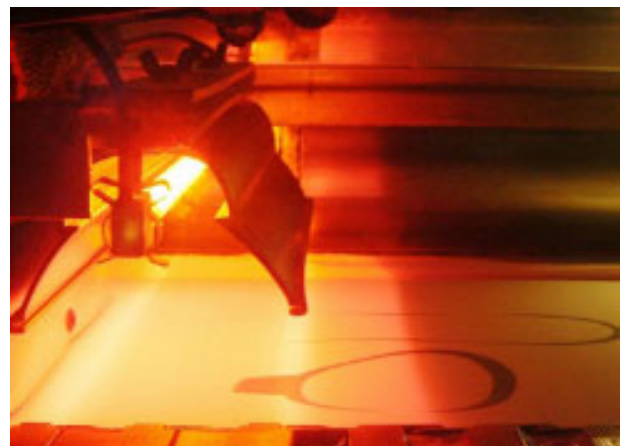
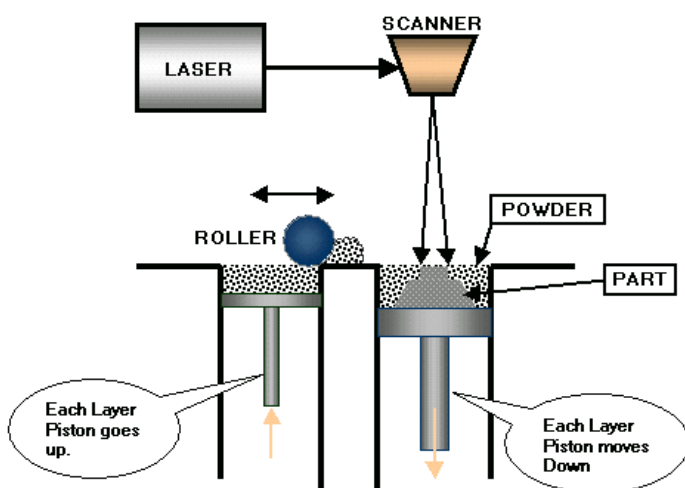


Fig 53: Polimerização de resina. Fonte: <https://formlabs.com/blog/3d-printing-technology-comparison-sla-dlp/>

### 2.2.3. Powder bed fusion (Fusão em base de partículas)

Processo de manufatura aditiva que solidifica material contido em um recipiente usando energia direta na forma de raio laser. Confere alta resolução, velocidade de impressão e não necessita de suportes.



Figs. 54 e 55: princípio da tecnologia por fusão de partículas. Fonte: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion>



#### 2.2.4. Binder Jetting (Jateamento)

Processo de manufatura aditiva no qual um líquido catalisador é depositado seletivamente para solidificar materiais em partículas muito pequenas, como areia ou pó.

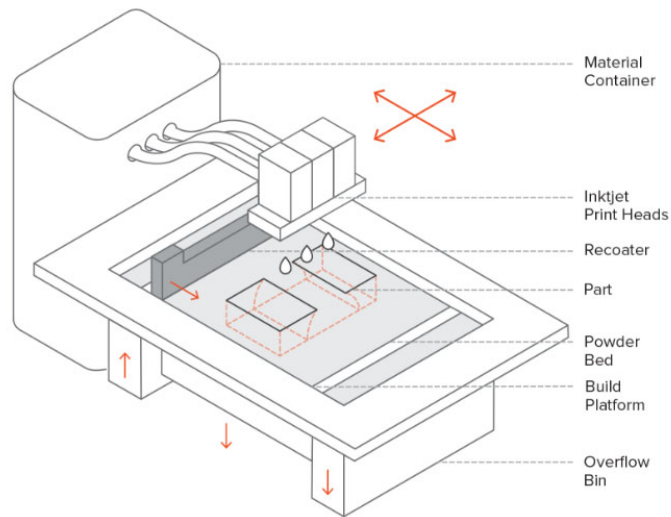


Fig 56. Princípio da tecnologia Binder Jetting. Fonte: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing>.

#### 2.2.5. Direct Energy Deposition (Deposição de energia direta)

Processo de manufatura aditiva onde a energia concentrada é utilizada para derreter o material, geralmente metal, na medida em que ele é depositado.

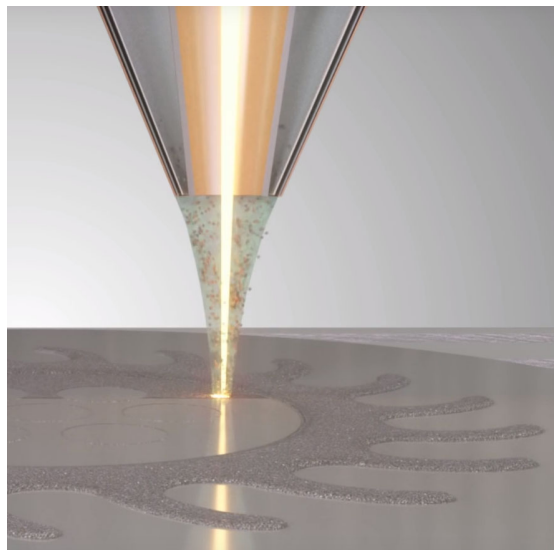


Fig 57. Princípio da tecnologia DED. Fonte: <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/direct-energy-deposition/>;

### 2.2.6. Sheet Lamination (laminação de folhas)

Processo de manufatura aditiva e subtrativa no qual lâminas, geralmente de papel são impressas, cortadas e coladas de forma sobreposta, formando o objeto.

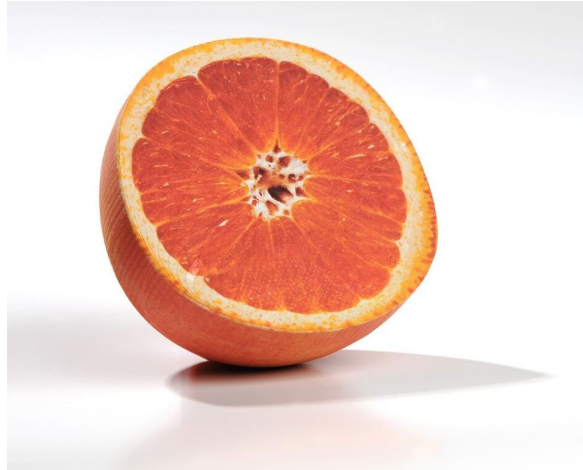


Fig 58.: Laminação de folhas. Fonte: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/lom-definition/>;

### 2.2.7. Material Jetting (Jateamento de material)

Processo de manufatura aditiva muito semelhante ao utilizado em impressoras baseadas em jato de tinta. Nessa modalidade, o material, geralmente uma resina fotossensível é depositada de forma seletiva e solidificada por uma luz ultravioleta.

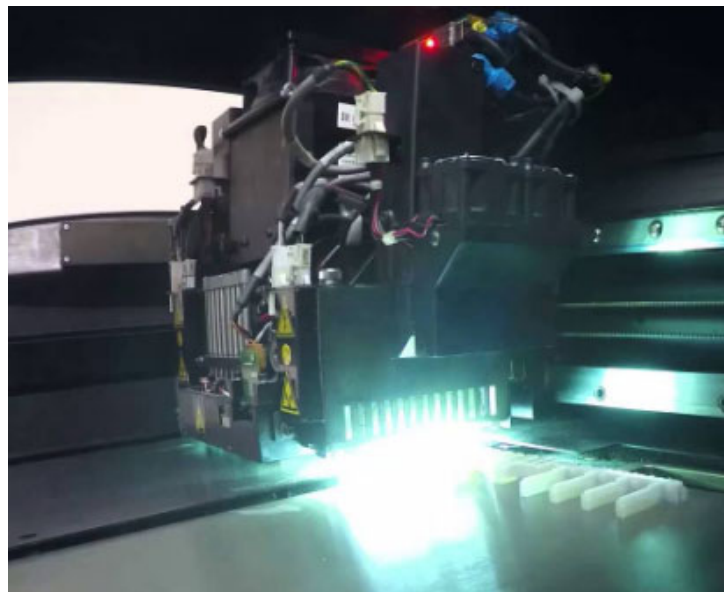


Fig 59.: Jateamento de material. Fonte: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-material-jetting-3d-printing>

### 2.2.8. *Material extrusion* (extrusão de material)

Processo de manufatura aditiva que deposita material de forma seletiva através de um bico com orifício.



Fig 60: Extrusão de material. Fonte: [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com)

### 2.3. Fluxo de trabalho para imprimir em 3D

O fluxo de trabalho para imprimir um objeto, em geral, segue a seguinte sequência:

#### a) Um modelo virtual em três dimensões é elaborado:

Esse modelo pode ser feito por operação direta do usuário, ou indireta, tirando partido de simulações computacionais ou escaneamento 3D. A modelagem por operação direta é feita através da combinação de vetores e comandos diversos como extrusão, criação de primitivas, NURBS, edição de polígonos, operações booleanas, etc. Atualmente, existem centenas de opções de programas de computador capazes de executar tal função. Muitos deles são *open source*, *on line* e possuem interface compacta para facilitar o uso por crianças ou iniciantes. Desde a década de 80, a manufatura aditiva evoluiu de forma contínua, criando máquinas mais eficientes. De acordo com o surgimento de novas demandas, diferentes tipos de soluções foram desenvolvidas, criando no decorrer da primeira década desse milênio diversas soluções tecnológicas em torno da manufatura aditiva.



Figs. 61-64 - Softwares de modelagem tridimensional. Fontes: [www.autodesk.com](http://www.autodesk.com); [www.onshape.com](http://www.onshape.com);

**b) O modelo 3D é convertido para o formato STL:**

Criado pela empresa 3D systems, o formato STL se tornou um padrão utilizado pelos programas de fatiamento, necessários no *workflow* da impressão 3D. Sendo compatível com a maioria dos programas de modelagem, o formato STL armazena apenas as informações referentes à superfície de um determinado objeto 3D, desconsiderando atributos normalmente existentes em objetos gerados por programas cad como coloração, textura, massa, centro de gravidade, alças de manipulação, etc. Desta forma, o objeto convertido em STL possui apenas as informações necessárias para o fatiamento.

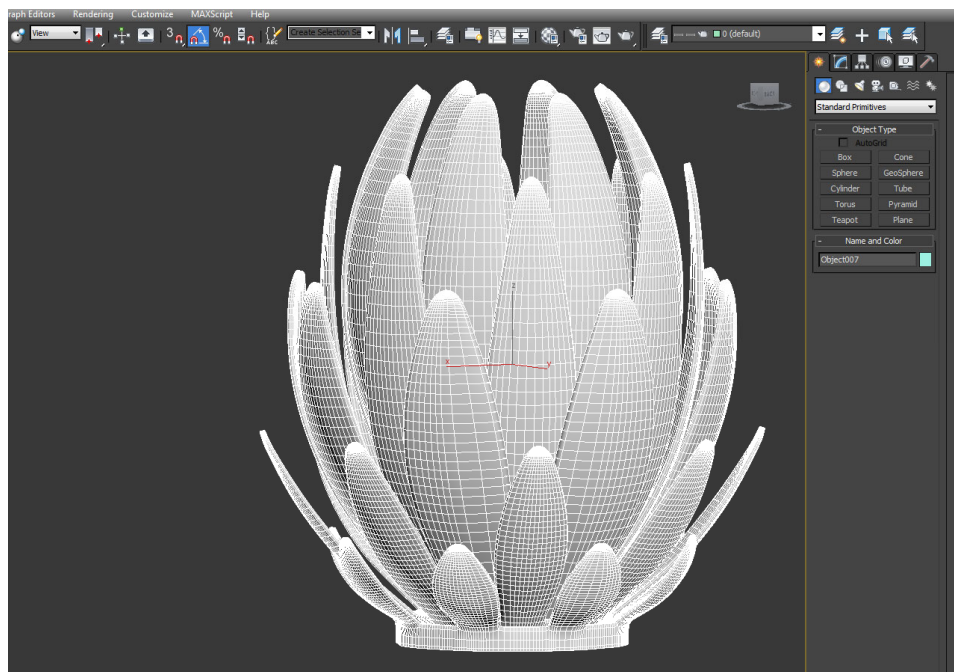
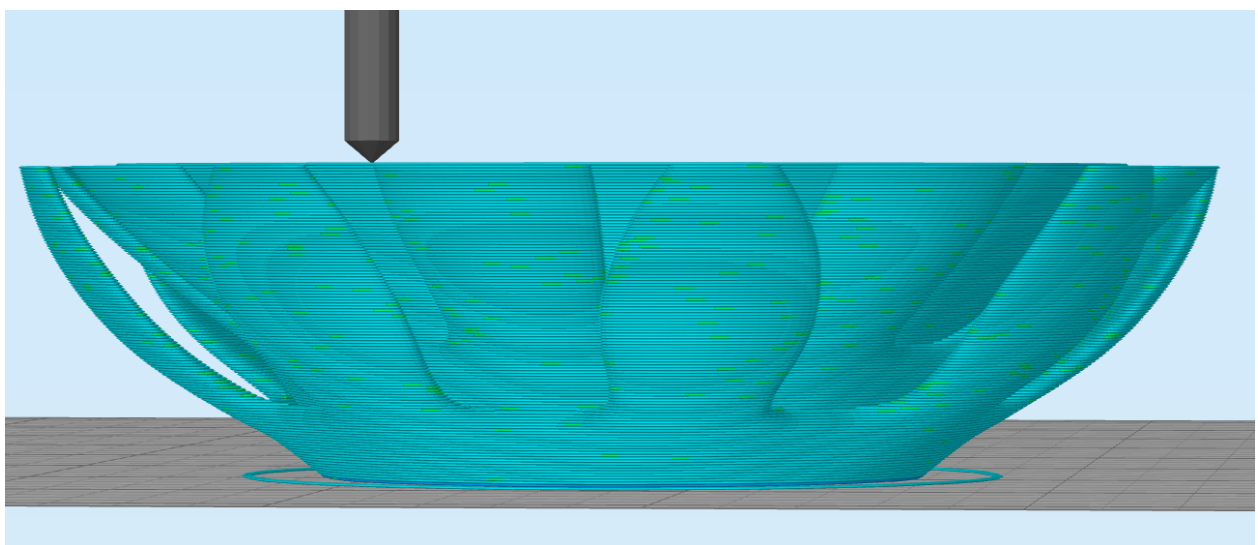
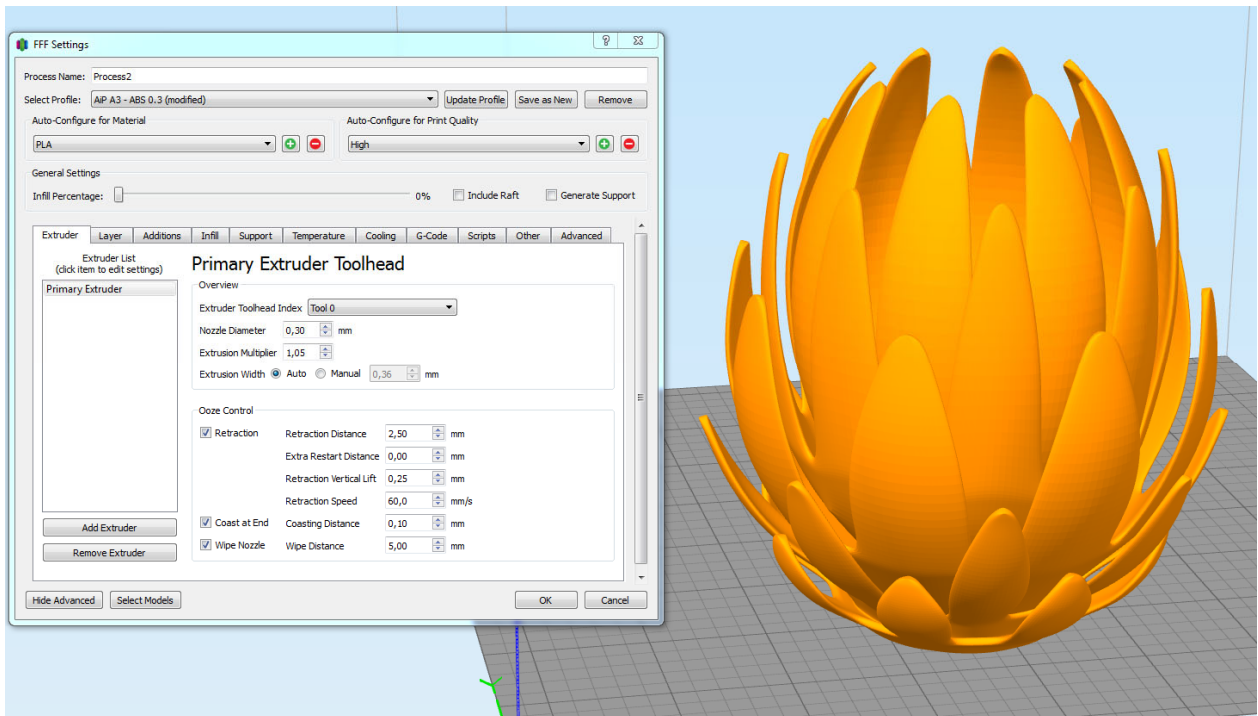


Fig. 65: Modelo feito pelo auto no software Autodesk 3DSMax. Fonte: o autor

**c) O modelo é “fatiado” em software específico:**

O fatiamento consiste na fragmentação do modelo 3D em lâminas. Cada lâmina é interpretada como uma camada e a sobreposição das camadas forma o objeto. Além da criação das camadas, o software de fatiamento fornece as informações para funcionamento da máquina, como velocidade dos motores, temperatura dos componentes, quando necessários, etc.



Figs 66 e 67: Configuração e fatiamento no software Simplify 3D. Fonte: o autor

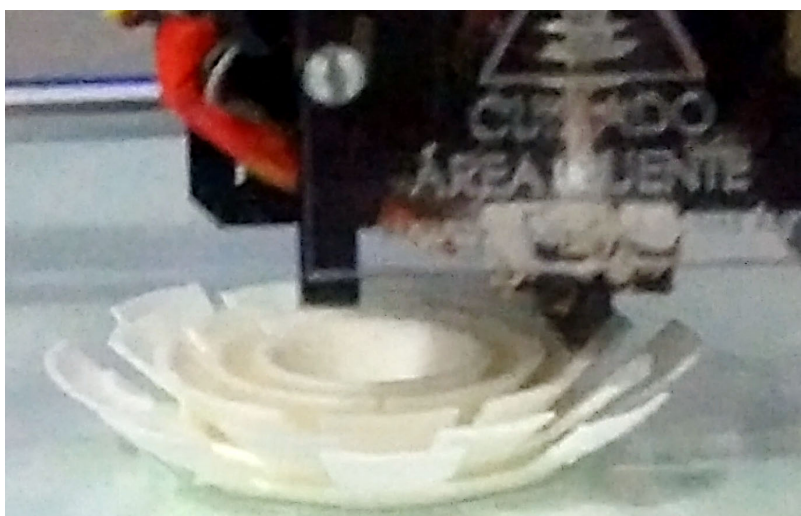
#### d) É gerado o GCODE:

O arquivo com os comandos numéricos para funcionamento do maquinário é chamado GCODE. Ele possui as informações numéricas completas para o funcionamento do maquinário para finalmente imprimir o objeto. Uma particularidade dos arquivos para impressão 3D é que eles possuem informação para traçar apenas linhas retas. Desta forma, objetos curvos são feitos com vários segmentos de linha.

```
G-Code generated by Simplify3D(R) version 3.1.1
mar 31, 2018 at 6:04:23
Settings Summary
: processName,Process1
: applyToModels,LOTUS 2018 NOVA
: profileName,AIP A3 - ABS 0.3 (modified)
: profileVersion,2016-11-10 10:02:36
: baseProfile,Default
: printMaterial,PLA
: printQuality,High
: printExtruders,
: extruderName,Primary Extruder
: extruderToolheadNumber,0
: extruderDiameter,0.3
: extruderAutowidth,1
: extruderWidth,0.36
: extrusionMultiplier,1.05
: extruderUseRetract,1
: extruderRetractionDistance,2.5
: extruderExtraRestartDistance,0
: extruderRetractionZLift,0.25
: extruderRetractionSpeed,3600
: extruderUseCoasting,0
: extruderCoastingDistance,0.2
: extruderUseWipe,1
: extruderWipeDistance,5
: primaryExtruder,0
: layerHeight,0.2
: topSolidLayers,3
: bottomSolidLayers,3
: perimeterOutlines,2
: printPerimetersInsideout,1
: startPointOption,1
: startPointOriginx,0
: startPointOriginy,0
: startPointOriginz,300
: sequentialIslands,0
: spiralVaseMode,0
: firstLayerHeightPercentage,100
: firstLayerWidthPercentage,120
: firstLayerUnderspeed,0.5
: useRaft,0
: raftExtruder,0
: raftLayers,1
: raftOffset,3
: raftSeparationDistance,0.14
: raftInfill,85
: disableRaftBaseLayers,1
: useSkirt,1
: skirtExtruder,0
: outerPerimeter
G1 X102.888 Y53.795 F6000
G92 E0
G1 X102.377 Y53.820 E0.0161 F900
G1 X102.016 Y53.883 E0.0276
G1 X101.438 Y54.047 E0.0465
G1 X100.895 Y54.241 E0.0646
G1 X100.509 Y54.408 E0.0778
G1 X100.127 Y54.610 E0.0914
G1 X99.600 Y54.952 E0.1111
G1 X99.157 Y55.297 E0.1288
G1 X98.898 Y55.532 E0.1398
G1 X98.828 Y55.603 E0.1429
G1 X98.661 Y55.793 E0.1508
G1 X98.510 Y55.998 E0.1589
G1 X98.074 Y56.690 E0.1846
G1 X97.790 Y57.243 E0.2041
G1 X97.634 Y57.648 E0.2178
G1 X97.530 Y58.061 E0.2312
G1 X97.465 Y58.511 E0.2454
G1 X97.441 Y58.880 E0.2570
G1 X97.448 Y59.537 E0.2777
G1 X97.520 Y60.032 E0.2934
G1 X97.687 Y60.721 E0.3157
G1 X97.905 Y61.344 E0.3364
G1 X98.113 Y61.765 E0.3512
G1 X98.372 Y62.155 E0.3659
G1 X98.692 Y62.540 E0.3817
G1 X98.967 Y62.831 E0.3942
G1 X99.515 Y63.352 E0.4180
G1 X99.697 Y63.492 E0.4252
G1 X100.068 Y63.731 E0.4391
G1 X100.611 Y64.028 E0.4586
G1 X101.047 Y64.223 E0.4736
G1 X101.522 Y64.381 E0.4893
G1 X102.012 Y64.481 E0.5050
G1 X102.549 Y64.535 E0.5220
G1 X102.986 Y64.546 E0.5357
G1 X103.601 Y64.520 E0.5551
G1 X103.967 Y64.466 E0.5667
G1 X104.464 Y64.327 E0.5829
G1 X104.941 Y64.157 E0.5988
G1 X105.465 Y63.924 E0.6169
G1 X105.820 Y63.725 E0.6296
G1 X106.314 Y63.385 E0.6485
G1 X106.742 Y63.025 E0.6661
G1 X107.075 Y62.684 E0.6811
G1 X107.331 Y62.339 E0.6946
```

Fig. 68: GCODE aberto em bloco de notas. Fonte: o autor

#### e) O GCODE é enviado para a impressora 3D e o objeto é impresso:



Figs. 69 e 70: Objeto sendo impresso e resultado final. Fonte: o autor

## 2.4. Vantagens da manufatura aditiva: Os 10 princípios da impressão 3D

Em 2013, a gerente de produto da Microsoft, Melba Kurman, apresentou os 10 princípios da impressão 3D em uma das edições da renomada conferência internacional sobre manufatura aditiva, Inside 3D Printing, edição San Jose, na Califórnia. Em sua apresentação, Kurman falou sobre o ambiente disruptivo da manufatura aditiva que ao mesmo tempo revoluciona o design e abre novas vagas de trabalho. A autora do livro “Fabricated: The new world of 3D printing” percebeu ao entrevistar profissionais do meio que haviam algumas regras em comum no processo de impressão 3D, organizando-as como princípios. Abaixo comenta-se os 10 princípios da impressão 3D:



Fig. 71. Fonte: <http://on3dprinting.com/tag/inside-3d-printing-san-jose/>

### - **Princípio 1: A mesma impressora pode fazer diversas formas: A complexidade de manufatura é grátis**

Considerando quantidade de material e tempo de impressão equivalentes, aumentar, ou variar a complexidade de um objeto não interfere no custo. Essa premissa é especialmente válida para modelos digitais semelhantes, criados automaticamente por algoritmos generativos, que dispensam esforço de modelagem computacional.



Fig. 72. Fonte: <https://charadeoomph.com/3d-printed-easter-eggs-by-young-designer/>

**- Princípio 2: A variedade é livre: uma máquina, várias formas.**

Ao contrário das máquinas projetadas para uma única função, as impressoras 3D são programáveis, sendo capazes de produzir diferentes formas apenas mudando o conteúdo do arquivo definido pelo GCODE.



Figs. 73 – 75. Fonte: <https://shakl3d.com/en/shop/art-and-fashion/mathematical-art/gyroid/>; <http://www.3dbenchy.com/print-ahoy/>; <http://cisana.net/extruder-calibration/>;

**- Princípio 3: A montagem não é necessária**

A impressão 3D possibilita produzir peças completas, dispensando a montagem. Na manufatura tradicional, as máquinas produzem peças idênticas individualmente que para criar o produto final deverão ser posteriormente montadas. Impressoras 3D mais modernas como as da categoria *Material Jetting*, materializam



objetos que além de montados, podem possuir materiais de diferentes propriedades físicas.



Figs. 76 e 77: Objetos impressos sem necessidade de montagem. Fonte: <https://obviate.io/2017/05/31/selecting-a-3d-printer/>; <https://pinshape.com/items/6985-3d-printed-large-print-in-place-ball-bearing-o145mm>;



Fig. 78: Fábrica da Boeing. Fonte: [https://www.youtube.com/watch?v=IL9xdQ\\_rRS8](https://www.youtube.com/watch?v=IL9xdQ_rRS8);

#### - Princípio 4: Fabricação imediata

Segundo esse princípio é possível imprimir um objeto sob demanda. Empresas como a Boeing, por exemplo, passaram a utilizar a manufatura aditiva como ferramenta para melhorar a logística de manutenção de suas aeronaves.

Algumas peças podem ser fabricadas apenas quando necessárias, evitando assim, estoques e reduzindo o tempo de manutenção das aeronaves.

#### **- Princípio 5: Design ilimitado**

A manufatura aditiva não depende de nenhuma ferramenta para criar os objetos. Assim, as possibilidades de fabricação oferecidas pela impressão 3D são ampliadas, criando novas frentes como, por exemplo, imprimir formas impossíveis de serem feitas por outras técnicas.



Fig. 79: Objetos complexos impressos em 3D. Fonte: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/>;

#### **- Princípio 6: Habilidade em fabricação desnecessária? Não necessariamente!**

Este princípio não é totalmente válido para a modalidade de manufatura aditiva por extrusão de material, especialmente nas máquinas de baixo custo e na impressão 3D de materiais pastosos. Vale lembrar que o processo para realizar a impressão 3D em geral é antecedido pelas etapas de modelagem e fatiamento que necessitam de algum conhecimento prévio como revisão e orientação do modelo,

criação de suportes, ajustes de temperatura, etc. Por outro lado, as máquinas industriais de impressão 3D por extrusão de material, como as do fabricante Stratasys, automatizam grande parte do processo, fazendo com que este princípio seja válido mesmo para a modalidade de extrusão de material. Outro conflitante com esse princípio diz respeito à necessidade de pós-produção como remoção de suportes, encaixes, detalhamentos e finalização como pintura, por exemplo.



Fig. 80: Crianças precisam de supervisão para operar impressoras 3D. fonte: <http://imaginary-spaces.com/2015/02/10/making-a-workshop-3d-printing-and-modding-minecraft-with-imaginary-spaces/>;

### **- Princípio 7: Manufatura compacta e portátil**

O espaço ocupado por uma impressora 3D é menor comparado ao necessário na manufatura convencional. Uma máquina de injeção plástica, por exemplo fabrica peças significativamente menores que elas próprias. Impressoras 3D cabem em uma mesa de trabalho residencial e conseguem fabricar objetos ligeiramente menores que sua área.



Fig. 81 – Josef Prusa. Celebrado inventor de uma das impressoras 3D open-source mais celebradas do mundo: a original Prusa i3. Fonte: <https://3dwithus.com/josef-prusa/josef-prusa-in-his-3d-printer-factory>;

### - Princípio 8: Desperdício mínimo

A manufatura aditiva em si é uma tecnologia que se beneficia do baixo ou nenhum desperdício. Essa premissa é válida especialmente para algumas modalidades como a impressão 3D de metal e concreto, cujas manufaturas tradicionais operam com altos índices de desperdício.

### - Princípio 9: Vários tipos de material, juntos

Com as impressoras 3D multi materiais, têm-se a capacidade de mesclar diferentes materiais de uma maneira impossível de ser feita por outra forma de manufatura.



Figs. 82 – Impressão 3D por Material Jetting – Polyjet. Fonte: [www.stratasys.com](http://www.stratasys.com);

## - Princípio 10: Produção em réplicas com alta precisão e fidelidade dimensional

Tal como ocorre nos arquivos digitais de música, os objetos impressos em 3D podem ser copiados indefinidamente mantendo as mesmas características. Vale ressaltar que essa exatidão depende também do controle de qualidade e composição dos materiais utilizados e da manutenção do maquinário. Mesmo assim, em geral, objetos quase idênticos podem ser impressos por máquinas diferentes em lugares distintos.

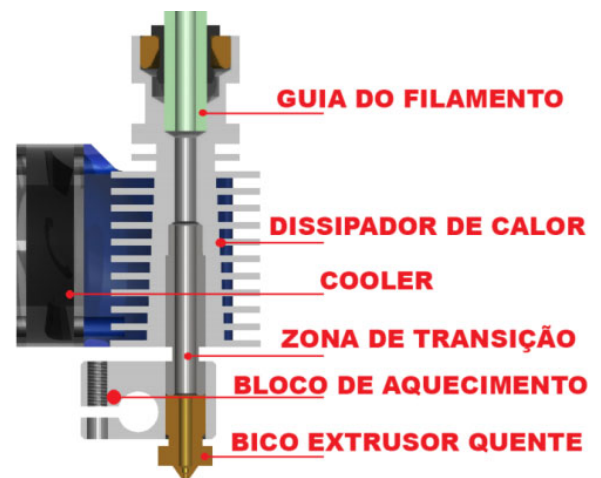
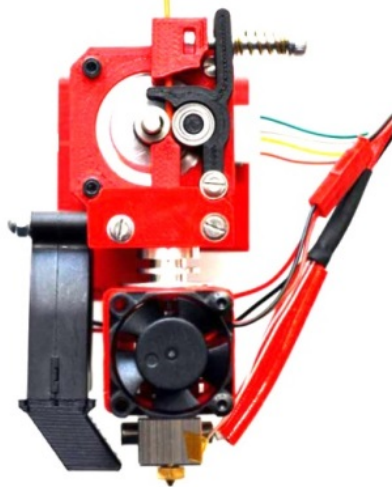


Fig. 83 – Produção de calçados da Adidas com nylon impresso em SLS; fonte: <https://www.3printr.com/adidas-steps-into-the-future-with-3d-printed-footwear-3231366/>;

### 2.5. O Projeto RepRap

A tecnologia de impressão 3D por fusão de filamento FDM/FFF, se enquadra na categoria de extrusão de material e funciona direcionando um filamento termoplástico, em geral com diâmetro de 1.75mm ou 3.0mm até um bico extrusor aquecido. Ao atingir o ponto de fusão, esse termoplástico pode finalmente ser depositado seletivamente sobre uma superfície em sucessivas camadas sobrepostas até que seja formado o objeto.

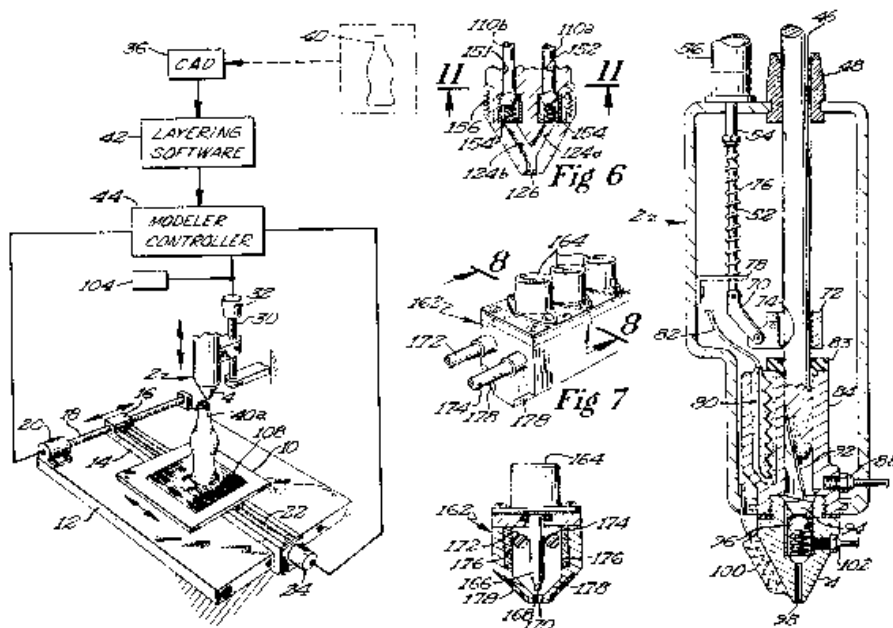
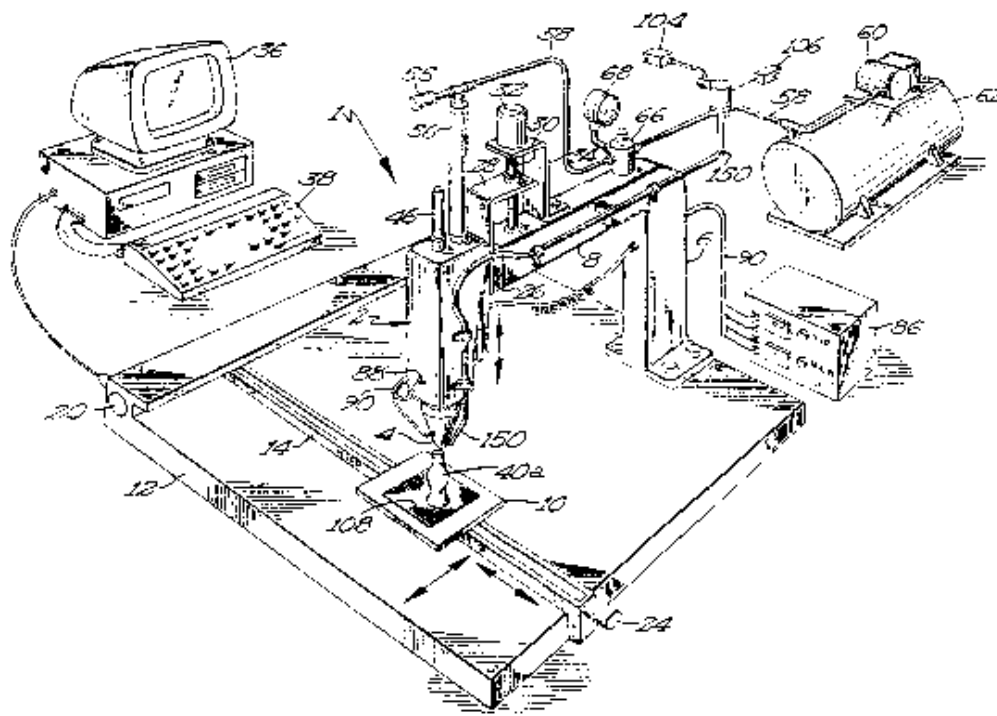
## SISTEMA EXTRUSOR FDM



Figs. 84 e 85. Sistema extrusor para fusão de filamento. Fonte: <https://www.matterhackers.com/articles/how-to-clear-and-prevent-jams;>

Apesar da impressão 3D por fusão de filamento ter sido criada e patenteada no final dos anos 90, a intensidade como ela se popularizou, após a queda da patente US5121329 em 2009 foi influenciada pelo projeto Reprap que teve início em 2 de fevereiro 2004, na Universidade de Bath, Inglaterra. Essa iniciativa liderada pelo professor de Engenharia Mecânica Adrian Bowyer tinha como objetivo criar uma impressora 3D que pudesse ser auto replicável e amplamente acessível, podendo ser criada e copiada de maneira simples e barata.

Durante quatro anos de pesquisa e contando com uma comunidade de colaboradores ao redor do mundo, em 8 de fevereiro de 2008 surgia a Darwin. Contando com peças impressas em 3D, hardware livre e componentes mecânicos de fácil disponibilidade no mercado, a Darwin deu um passo importante na popularização das impressoras 3D. A tecnologia empregada na Darwin era baseada na FDM. Por esse motivo foi utilizada a nomenclatura FFF (fused filamento fabrication) como uma maneira de driblar a patente da STRATASYS. Com o final da vigência da patente US5121329 em outubro de 2009, a exploração comercial da tecnologia FDM foi finalmente liberada.



Figs. 86 e 87: Desenho industrial da patente US5121329, depositada pela STRATASYS em 1989, intitulada: "Aparato e método para a criação de objetos tridimensionais"; Desenho industrial da patente US5121329, mostrando detalhes do bico extrusor. Fonte: google patents

De posse da patente depositada em 1989, que protegia a impressão 3D FDM, tecnologia criada pela empresa STRATASYS, a impressão 3D por fusão de filamento trouxe praticidade e velocidade de impressão em um momento no qual a impressão 3D dependia da solidificação seletiva de resina através de raio laser, tecnologia conhecida como estereolitografia (SLA). A impressão por fusão de filamento tirou proveito da já estabelecida indústria de plásticos e obteve grande

aceitação com diversas cores e tipos diferentes de polímeros como o ABS (Acrilonitrila butadieno estireno) e PLA (poliácido láctico). As características mecânicas desses polímeros, diferentemente da tecnologia SLA, mostraram potencial para uso em produto final e não apenas em protótipo. Outro fator determinante para a confiabilidade da impressão 3D FDM/FFF está no uso de filamentos pré-fabricados em ambiente controlado. A utilização de insumo que dispensa pré-mistura antes ou durante a impressão e que normalmente precisa ser aquecido a mais de 200°C, diminui a margem de erro, mitigando parcialmente os condicionantes externos como temperatura e humidade. Desta forma, as chances de sucesso da materialização sem defeitos são potencializadas.



Fig. 88: Filamentos para impressão 3D FDM: ampla variedade de cores. Fonte: <https://3dprintingforbeginners.com/filamentprimer/>;

O que se viu nos anos seguintes foi um grande crescimento da popularidade das impressoras 3D tendo o ápice no ano de 2014. Em paralelo, importantes mudanças culturais ocorriam no mundo como o surgimento de um novo mercado consumidor, uma nova cadeia produtiva baseada na transferência de arquivos que podiam ser materializados em qualquer lugar do mundo, o fortalecimento do movimento *Maker*, das comunidades de design aberto, o advento das *startups* e o sucesso de modelos de financiamento coletivo independentes o *crowd funding*.

O projeto Reprap, através da sua filosofia *opens ource*, teve grande contribuição na popularização e principalmente no desenvolvimento da impressão 3D. Diversas máquinas criadas pela comunidade do projeto foram utilizadas como base, aprimoradas e vendidas comercialmente por um número crescente de empresas que viram na impressão 3D um nicho de negócio promissor. Praticamente todas as impressoras 3D *desktop* disponíveis no mercado atualmente tem como base algum modelo desenvolvido pela comunidade Reprap.



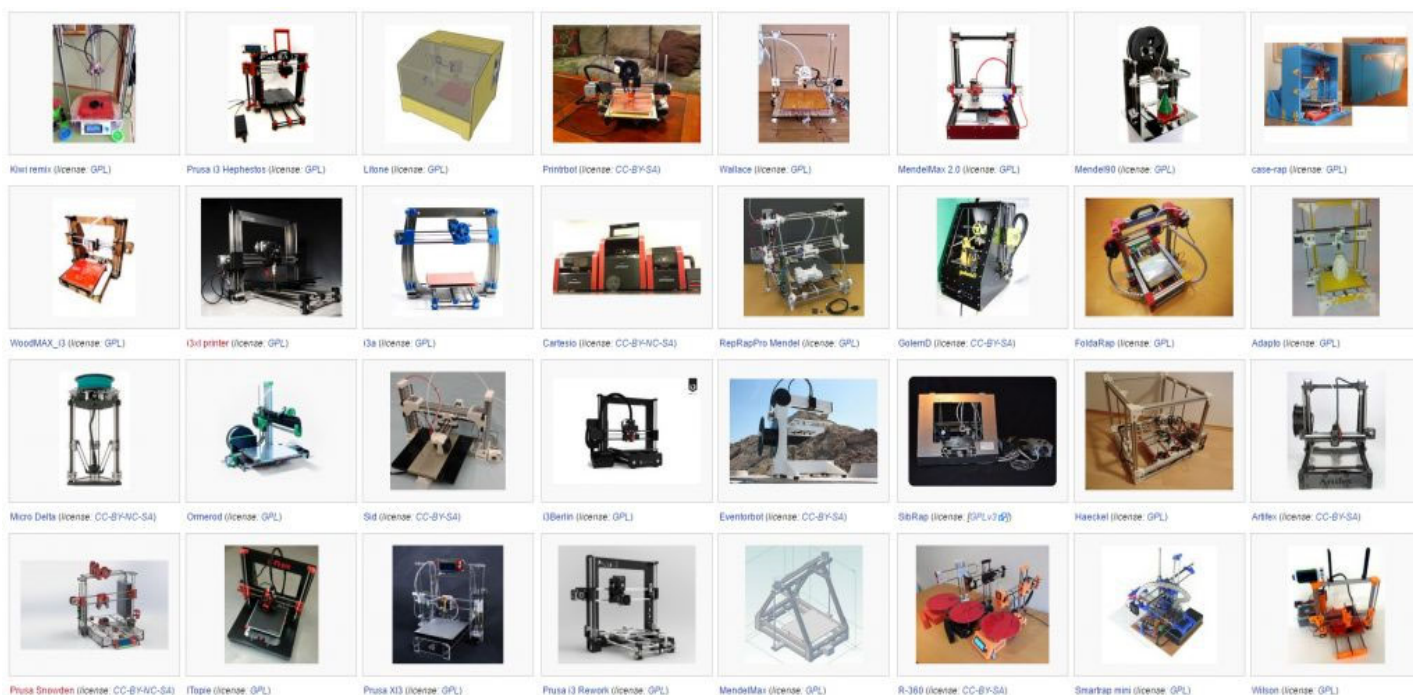
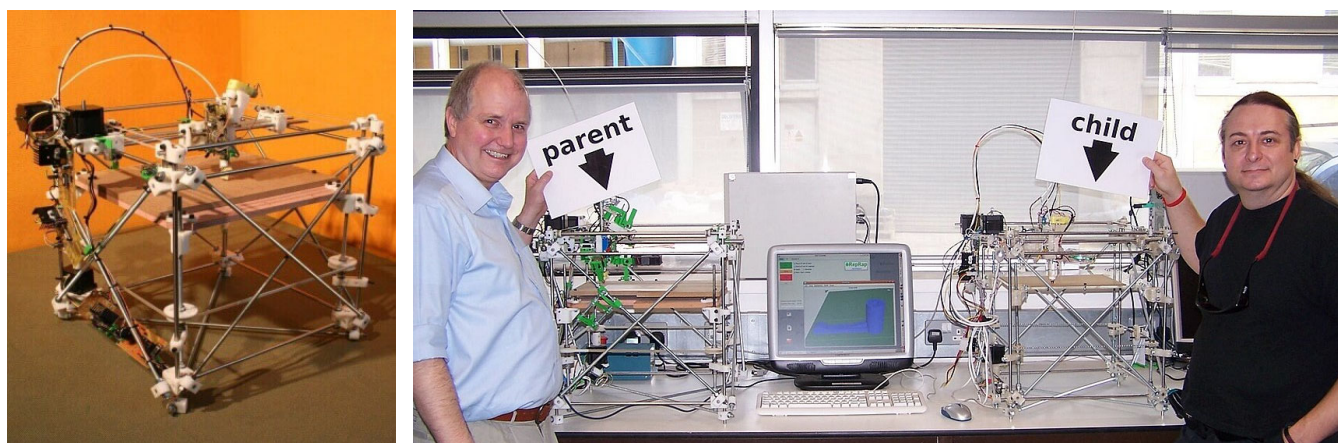


Fig. 89: Após a darwin, dezenas de modelos opensouce foram desenvolvidos. Fonte: [https://reprap.org/wiki/RepRap\\_Options](https://reprap.org/wiki/RepRap_Options);



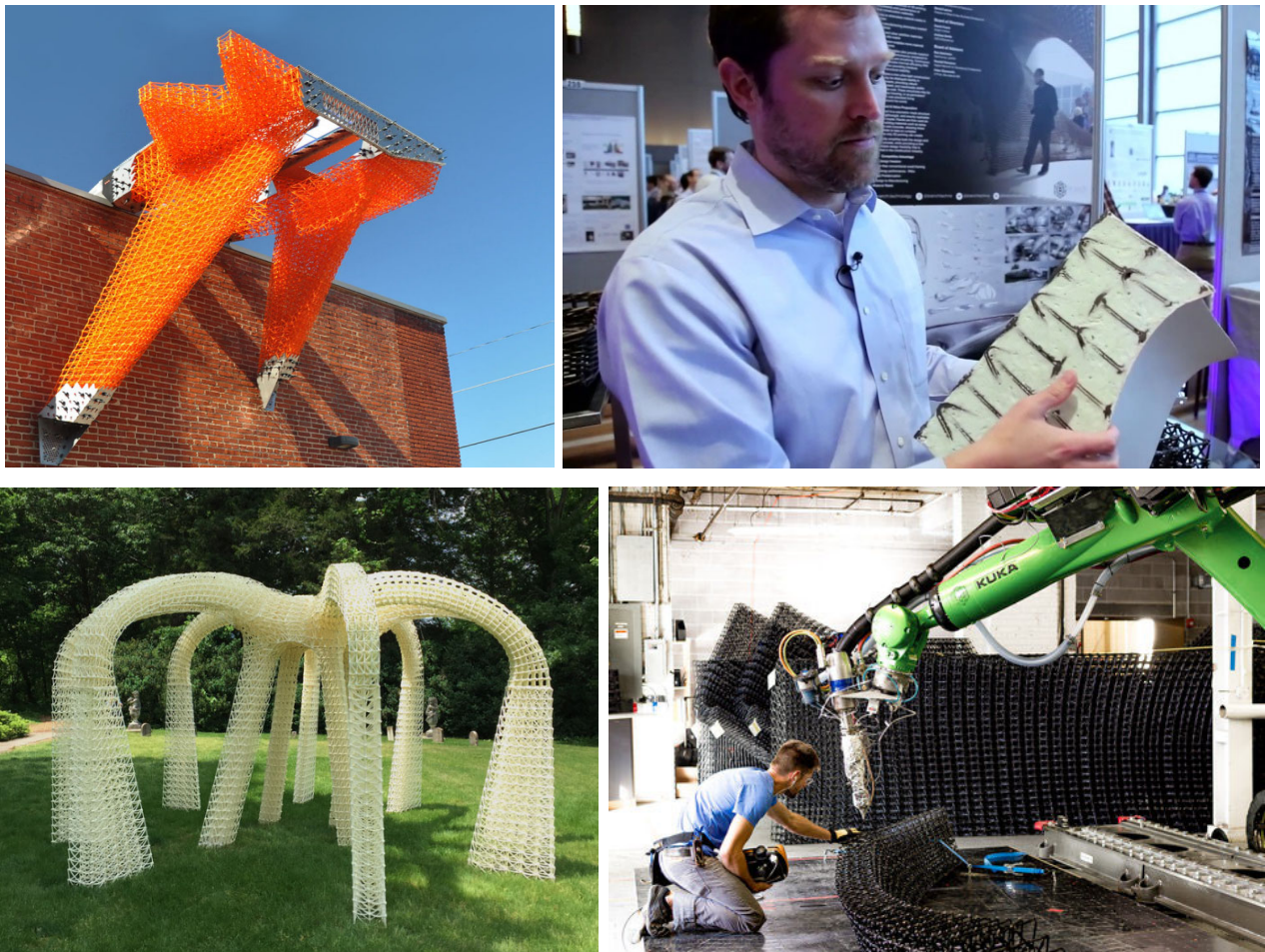
Figs.90 e 91: Darwin, a primeira impressora auto replicável desenvolvida pelo projeto Reprap. Fonte: reprap.org

## 2.6. Impressão 3D na arquitetura

Com a evolução das máquinas para impressão 3D, experimentos começaram a ser feitos em escalas cada vez maiores. Muitos experimentos foram feitos utilizando principalmente a impressão 3D FDM para criação de pavilhões temporários. Porém, as iniciativas mais relevantes para peças arquitetônicas são geradas com o uso de braço robótico fazendo extrusão de material polimérico a

partir de pelotas de polímeros compostos até mesmo por fibras de carbono. Uma empresa que ganhou visibilidade com iniciativas como essa foi a estadunidense Branch Technology. A tecnologia desenvolvida por esta empresa cria formas livres a partir de treliças espacialmente construídas, delgadas e resistentes pela forma. A extrusão de material ocorre criando as barras e nós no sentido longitudinal, mitigando dessa forma os problemas de pontos frágeis.

As estruturas treliçadas leves criadas pela *Branch Technology* foram testadas em diversas situações, como pavilhões temporários, eventos e mobiliário. Outra possibilidade estudada é o preenchimento das treliças com espuma expansiva, com fechamento duplo de placas digitalmente cortadas, dando possibilidade para a criação de superfícies com curvatura complexa. Os modelos feitos pela empresa utilizam sistema algorítmico para geração das treliças, bem como simulações para otimização topológica. O modelo de negócio dessa empresa permite que o cliente envie arquivos para serem transformados em estruturas treliçadas para impressão.



Figs.92 - 95: possibilidades da Branch Technology. Fonte: <https://www.branch.technology/>;



## CAPÍTULO 3

## CAP. 3: IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO

A impressão 3D em concreto para uso na construção civil é um dos desdobramentos do advento da tecnologia de manufatura aditiva desenvolvida originalmente na década de 1980. Ela surgiu da busca pela ampliação da dimensão física das primeiras impressoras 3D de polímeros (SLA e FDM), para torná-las capazes de fabricar objetos tão grandes quanto uma casa. Também conhecida como 3D Concrete Printing (3DCP), a manufatura aditiva em concreto, tem sido pesquisada e desenvolvida por vários grupos com diferentes objetivos (KREIGER et Al., 2015), destacando-se os esforços empreendidos por pesquisadores na criação de novos instrumentos, técnicas, aparatos e materiais. Nesse sentido, duas categorias são destacadas e serão detalhadas nesse capítulo:

- 1 - Modelagem por deposição de material pastoso (LDM);
- 2- Modelagem por ativação seletiva de agente aglutinante em base plana.

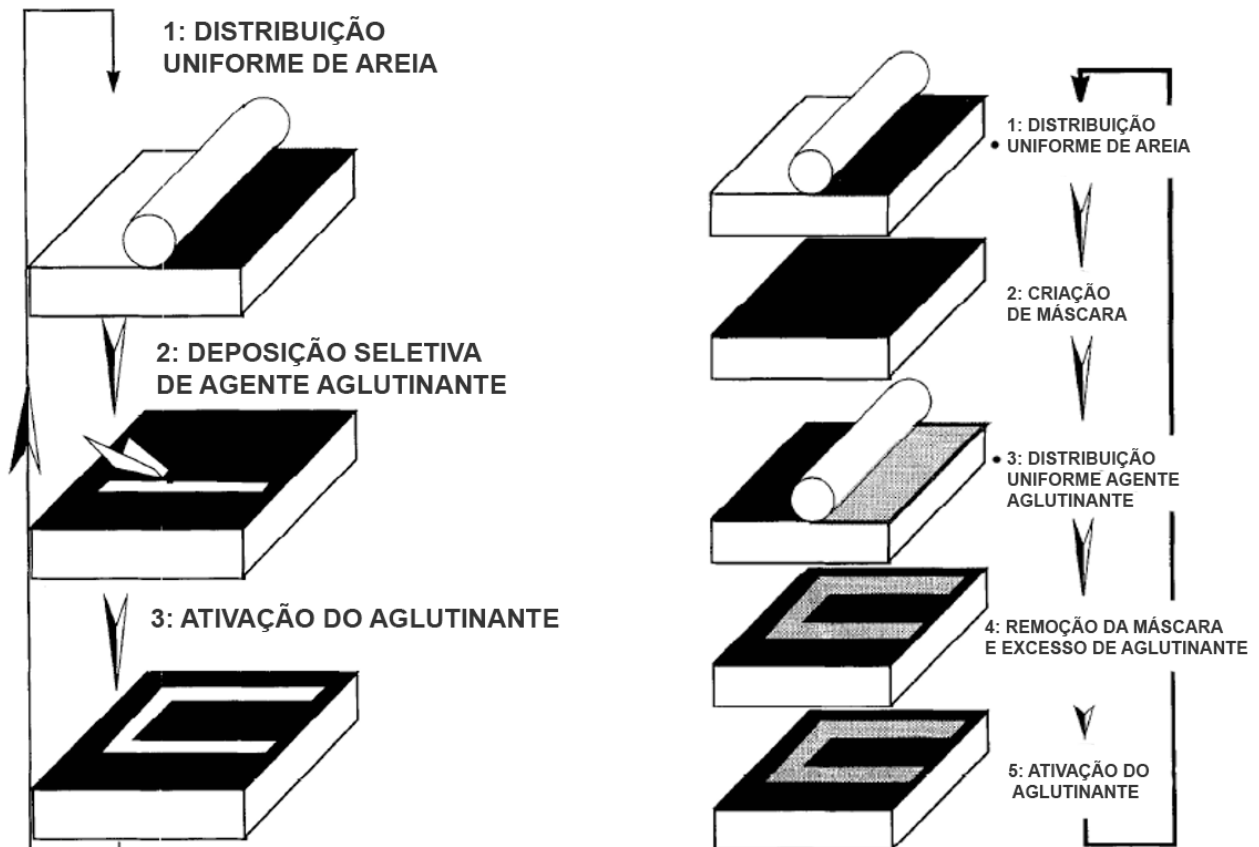


Fig. 96 – 98 – Da esquerda para a direita: Joseph pegna, Behrokh Khoshnevis e Enrico Dini. Nomes importantes na história impressão 3D em concreto. Fonte:

[https://www.researchgate.net/profile/Joseph\\_Pegna](https://www.researchgate.net/profile/Joseph_Pegna); <http://digitalconcrete2018.ethz.ch/conference-awards/>; <https://3dprinting.com/sand-glue/the-story-of-enrico-dini-the-man-who-prints-houses/>;

Como primeiro movimento neste sentido, vale ressaltar, em 1997, o trabalho do Prof. Joseph Pegna, do Departamento de Engenharia Mecânica da *Rensselaer Polytechnic Institute*. Em artigo intitulado “Investigação Exploratória de Construção Sólida de Formas Livres”, Pegna descreve um processo que consiste na deposição de finas camadas de areia, sobrepostas seletivamente por cimento e curadas com o

uso de vapor (PEGNA, 1997). Apesar de se tratar de uma pesquisa na qual a composição do material não se configura como concreto, a intenção do uso de tecnologia para automatizar a construção foi evidenciada. A referida invenção, no entanto, teve seu desenvolvimento descontinuado.



Figs.99 e 100: Princípio utilizado por Pegna. Fonte: (PEGNA, 1997)

Passada esta primeira iniciativa, em 2001, sob a liderança do pesquisador Behrokh Koshnevis da Universidade do Sul da Califórnia (USC), é criada a tecnologia de 3DCP intitulada *Contour Crafting - CC* (Construção por Contornos), que consiste na extrusão de concreto em estado pastoso com deposição controlada por computador (KOSHNEVIS, 2001). Após o *Contour Crafting*, surgiram outras iniciativas utilizando abordagens tecnológicas diferentes para a 3DCP, como os projetos *D-Shape* (*Selective Binder activation*), na Itália, e o *Free Form Concrete Printing* (LDM + camadas 3D com uso de suportes e formas livres), no Reino Unido, (LIM et Al, 2012), projetos que, apesar de tecnicamente distintos, destacam-se pelo pioneirismo na fabricação digital de peças grandes por sobreposição de camadas

utilizando concreto como material (GARDINER, 2011). Mais recentemente, novos desdobramentos dessas tecnologias pioneiras possibilitaram um avanço ainda maior, permitindo o uso comercial da impressão 3D em concreto, sendo identificadas atualmente dezenas de opções na academia e no mercado.



Figs.101 - 103: Da esquerda para a direita: Contour crafting; D-Shape e 3DCP – Loughborough University.

### 3.1. Modelagem por deposição de material pastoso (LDM)

Nesse tópico, a Liquid Deposition Modeling (LDM) será explorada no sentido de identificar seu princípio de funcionamento e possibilidades de uso com foco principal na construção de elementos de arquitetura e design. Nos últimos anos, se viu um rápido crescimento dos métodos de impressão 3D para construção civil com argila e concreto. (WOLFS et Al. 2018). Dos primeiros experimentos feitos pelo Contour Crafting, em 2001, até os dias de hoje, diversas soluções em termos de maquinário foram desenvolvidas e patenteadas (LIM et al, 2012).

A tecnologia LDM, apesar de ainda estar em fase de experimentação e aprimoramento, ultrapassou o estágio inicial de desenvolvimento, tornando possível seu uso comercial. Atualmente algumas empresas como a Apiscor, Winsun, Total kustom e Xtree, entre outras, operam comercialmente, algumas vendendo maquinário e utilizando a tecnologia de impressão 3D em concreto para fabricação de peças de grande formato por extrusão de material.

Como classificação, a LDM não é citada na tabela da ASTM, ilustrada pela 3DHubs. Por ser uma tecnologia essencialmente de impressão 3D por extrusão de material, a tabela poderia ser atualizada segundo a imagem a seguir:



Fig.104: adaptada da tabela 3d hubs. Fonte: o autor

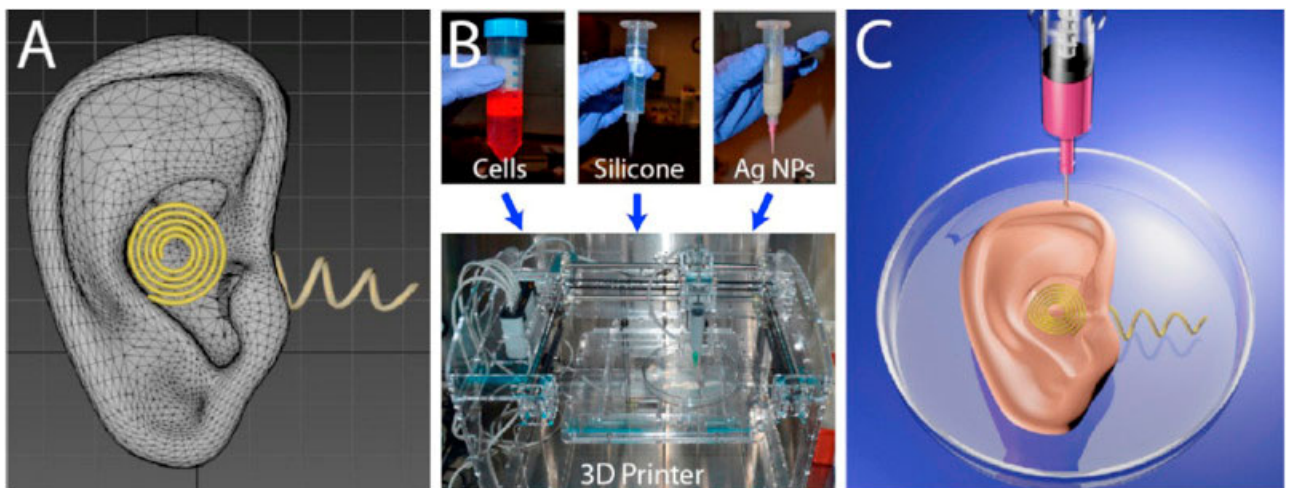
Embora tenha origem nos anos 1990, o termo LDM (liquid deposition modeling) vem sendo utilizado de forma mais abrangente desde 2012 com a iniciativa do projeto da empresa italiana WASP (World's Advanced Saving Project), conhecida por fabricar impressoras 3D tipo *delta printers* de pequeno e grande porte para uso com argila e adobe. (ROSENTHAL 2017). A tecnologia LDM funciona de forma semelhante à impressão 3D por fusão de filamento FDM/FFF de três eixos. A principal diferença entre essas duas tecnologias está no sistema de extrusão empregado em cada uma delas e no fato de a LDM para concreto e argila não utilizar calor no processo. Impressoras 3D FDM, baseadas no projeto RepRap podem ser facilmente adaptadas para uso com deposição de líquido. Alguns modelos de máquinas oferecem, inclusive, a possibilidade de intercâmbio entre FDM, *Laser*, fresa e seringa, como a máquina da empresa Z-Morph.

Ampliando-se a escala do equipamento, porém, a parte mecânica e eletrônica necessita de um porte mais próximo ao encontrado nos equipamentos industriais. Dependendo do tipo de arranjo eletrônico/mecânico, podem ser necessários equipamentos complementares. De acordo com a potência, tamanho e a capacidade de carga do sistema de movimentação os itens devem ser corretamente dimensionados.



Figs.105 e 106: Impressão 3D em Argila

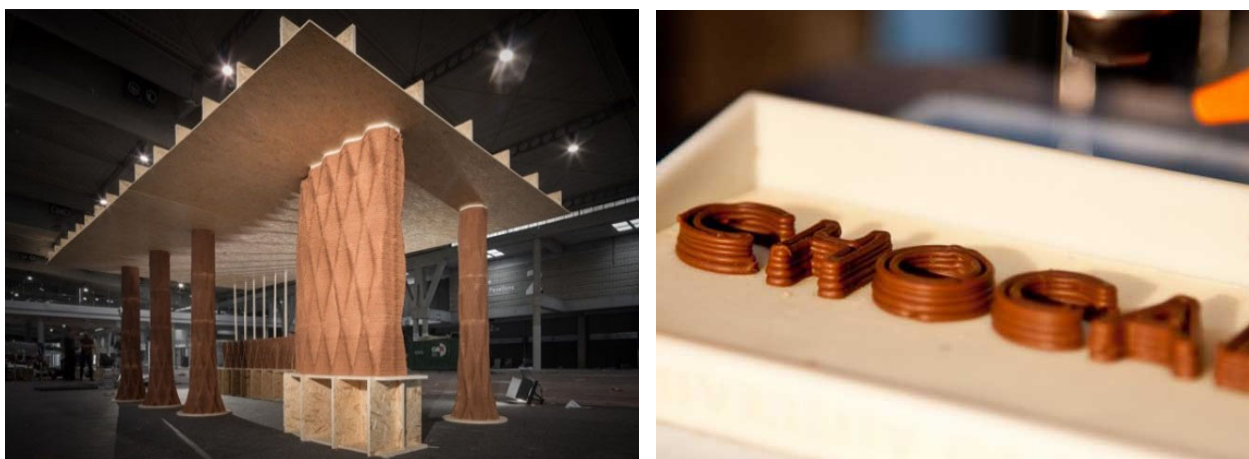
A nomenclatura LDM compreende uma gama de materiais com diversas viscosidades, podendo variar desde líquidos mais viscosos como colágenos e espumas expansivas, até materiais menos viscosos como os encontrados em formulações específicas de concreto e argila. Nem todos os materiais empregados nessa técnica mudam do estado líquido/pastoso para o sólido. Alguns tipos de hidrogel utilizados na medicina possuem colágeno em sua composição, mantendo o estado gelatinoso. Já os materiais utilizados na construção civil, adquirem o estado sólido geralmente por processos de cura (concreto) e ressecamento (argila). Outros materiais modificam seu estado físico de acordo com a temperatura, no caso de alguns alimentos, como o chocolate.



Figs.107-109 – Impressão 3D com material biológico em meio gelatinoso



No sentido de tornar a identificação da técnica mais específica, alguns autores nomeiam a modelagem por deposição de líquido, LDM, em subcategorias de acordo com o material utilizado. Termos como concrete printing, clay printing, food printing e bio printing, apesar de se tratarem de técnicas distintas, têm em comum o uso de material líquido ou pastoso como matéria prima.



Figs.110-111: Impressão 3D em Concreto, argila e chocolate

A área imprimível observada nas impressoras 3D LDM, varia de poucos litros dos modelos desktop, para uso com argila, até os sistemas de grande porte com vários metros cúbicos. Assim, na tecnologia LDM, o insumo líquido ou pastoso é preparado antes ou durante a impressão e bombeado até o bico extrusor para que a manufatura aditiva seja feita. O sistema de extrusão é assim considerado por compreender o conjunto de equipamentos que permitem executar a sequencia de mistura, bombeamento, transporte e extrusão do material. Sendo um dos elementos mais importantes em uma máquina LDM esse sistema será abordado de maneira mais detalhada.

Dentre os diversos componentes essenciais, necessários ao funcionamento das máquinas impressoras 3D LDM, independentemente do seu porte, temos os mecanismos de controle, movimentação, mistura, bombeamento e extrusão. Como elemento virtual nesse processo, tal como ocorre na impressão 3D FDM, softwares de modelagem, fatiamento e transcrição, geram o código G: linguagem reconhecida pela máquina e necessária para materializar o desenho tridimensional. Mesmo com o sucesso alcançado no desenvolvimento dos diversos sistemas de movimentação das máquinas, o uso de alguns materiais pastosos apresenta comportamento

imprevisível, tornando a entrega do produto final uma tarefa desafiadora. “...Os atuais processos de manufatura 3DCP são pouco confiáveis, necessitando de operadores de maquinário qualificados e um cuidado extraordinário na preparação e formulação dos materiais. (R.A.Buswell et al. 2018)

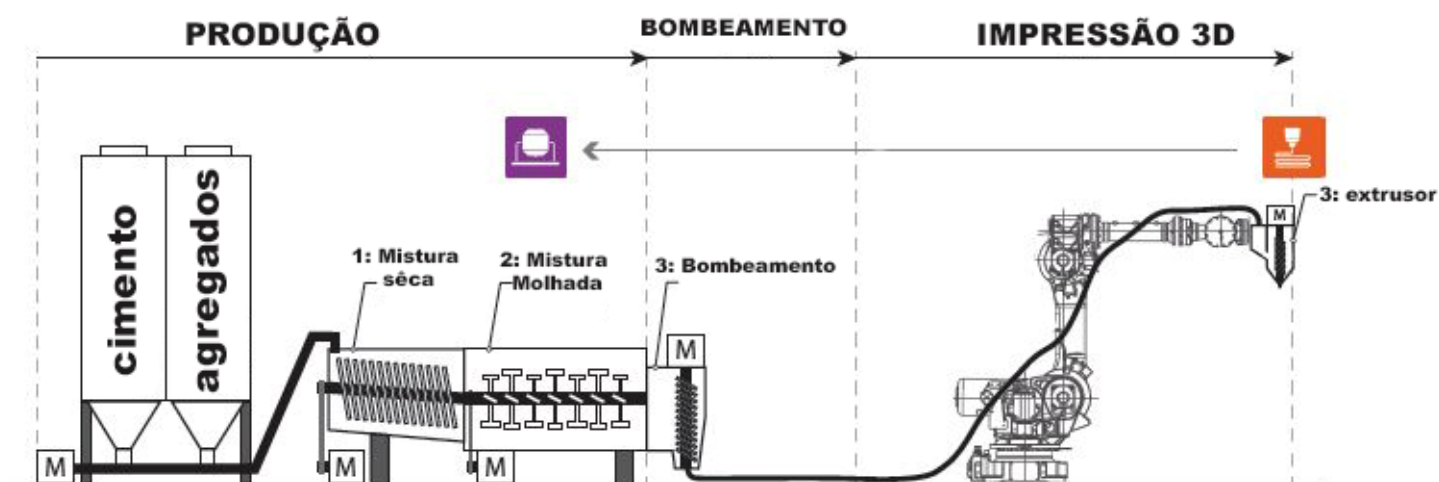


Fig.112: Sistema completo para impressão 3D em concreto

Um dos fatores que a torna a tecnologia LDM mais complexa que a FDM se deve ao fato de que qualquer insumo em estado líquido com viscosidade variável pode ser utilizado. Além disso, materiais pastosos podem ter comportamentos diferentes por variação de temperatura e humidade, ou mesmo devido a pequenas mudanças em sua composição, como tipo da água utilizada, por exemplo. Como não existe uma solução única que contemple todas as densidades/viscosidades dos insumos utilizados na LDM, necessita-se adequar os parâmetros do sistema para cada material. Os meios para que seja exercida pressão sobre o insumo, possibilitando seu deslocamento variam de acordo com sua quantidade, área de impressão, diâmetro do bico extrusor, espessura da camada, e tipo de material utilizado. (ZOCCHI 2016). A mudança de parâmetros do sistema é uma ação comum mesmo nas modalidades de manufatura aditiva onde há um controle maior nos processos. Na tecnologia FDM, por exemplo, alguns polímeros de cores diferentes podem precisar de temperaturas e coeficientes de extrusão também distintos.

O principal motivo que dificulta o estabelecimento de um protocolo de presetagem para os mecanismos de bombeamento e extrusão de materiais pastosos se deve à diversidade de características físicas dos materiais. Por serem formulados

no momento do uso, há uma margem para experimentação de dosagens e aditivos. Além disso, o uso de insumos de fabricantes distintos e as variações de temperatura e humidade no ambiente de fabricação dificultam o estabelecimento de um padrão com margem de erro controlada, tal como ocorre nos processos de produção industriais. Essa variação, afeta diretamente os condicionantes necessários ao sucesso da materialização de um modelo 3D feito com material pastoso.

### 3.2 . Condicionantes de “printabilidade”

No sentido de obter sucesso na impressão 3D LDM, alguns condicionantes devem ser considerados durante o desenvolvimento dos materiais. As características a seguir são especialmente válidas para o material concreto, mais especificamente, o “microconcreto” utilizado em impressão 3D (LIM et al, 2012)

#### - Bombeabilidade:

A bombeabilidade na impressão 3D em concreto é definida como a capacidade do material se movimentar pela mangueira antes de sua extrusão. A viscosidade do concreto é medida antes de sua extrusão através do teste de *slump*. Em geral, as misturas de concreto para impressão 3D são mais viscosas para poder suportar o peso das camadas sobrepostas (construtibilidade), sendo desejado o uso de misturas que confirmem o valor de *slump* próximo, ou igual a zero. Misturas que apresentam baixa viscosidade (muito flúidas) são inadequadas para uso em impressão 3D.



Figs.113 e 114 – Pequenas diferenças na proporção de água podem gerar resultados bem diferentes na viscosidade do concreto, inviabilizando seu uso para impressão 3D.

### - Extrudabilidade:

É definida pela capacidade do material em se movimentar através do bico extrusor. Considerando que a impressão 3D em concreto utiliza bicos extrusores para a deposição seletiva é importante que o fluxo de material aconteça, sem interrupções inesperadas. Bolhas de ar, entupimentos e segregação são os principais problemas encontrados no momento da extrusão do concreto impresso e podem ser verificados por inspeção visual.

### - Construtibilidade:

Consiste na capacidade do material manter sua forma, resistindo à deformação por achatamento quando submetido ao peso das camadas subsequentes. A construtibilidade na impressão 3D em concreto pode ser medida de acordo com a quantidade de camadas sobrepostas sem que haja deformação significativa das camadas inferiores. Deformações inesperadas podem comprometer a dimensão e a forma do produto final, ou mesmo o colapso do objeto impresso. Algumas pesquisas tiram partido dessa característica para criar formas não planejadas nas etapas de modelagem e fatiamento, fazendo com que a força gravitacional atue antes do material estar devidamente curado, criando padrões de acabamento distintos.



Figs.115 – 117: Imagem à esquerda mostra testes para atingir a construtibilidade desejada. Imagem do meio tira partido de resultados não explicitados na modelagem. Imagem à direita ultrapassa os limites da construtibilidade para criar objetos artísticos em concreto impresso.

#### **- Tempo de pega (*open time*):**

É o período no qual é possível utilizar o material antes que ele inicie o processo de endurecimento. É possível determinar o tempo de pega através do aparelho de *Vicat*. A inexistência de um padrão de composição resulta em valores de tempo de pega diferentes. O material base deve ser formulado de tal forma que o tempo de pega permita uma boa aderência sem prejudicar o achatamento pela sobreposição das camadas, possibilitando uma forma tão monolítica quanto possível e suficientemente rígida para suportar o próprio peso (LABONNOTE, 2016).

#### **- Aderência entre camadas:**

A aderência entre camadas é uma característica bastante estudada na manufatura aditiva em concreto, uma vez que ele afeta diretamente integridade estrutural da peça. Na impressão 3D em concreto, cada camada é única, apresentando variações com o decorrer do tempo. A aderência fraca (juntas frias) ou mesmo o descolamento de camadas é um fenômeno observado com certa frequência na LDM.

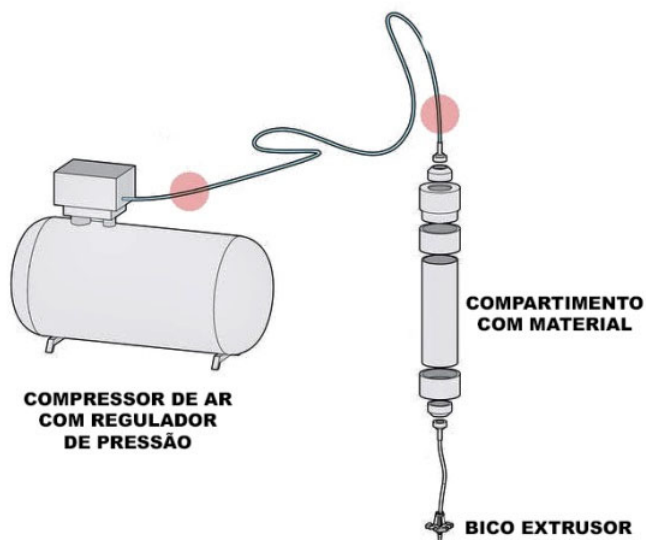
### **3.3. Sistema de bombeamento para extrusão LDM:**

O bombeamento na impressão 3D LDM consiste no transporte de material pastoso do local de armazenamento, até o bico extrusor. Nos sistemas de maior porte, como os utilizados para imprimir peças grandes de concreto e argila, a quantidade de insumo pastoso costuma pesar acima do limite suportado pelo sistema que movimenta o bico extrusor fazendo com que o material utilizado seja armazenado em reservatórios separados da máquina.

Nem todos os tipos de bombeamento mecânico garantem a uniformidade do fluxo, condição necessária para o sucesso da materialização do modelo desejado sem defeitos. Apesar da diversidade de tipos de bombas existente no mercado, serão descritos os principais mecanismos utilizados para uso em impressão 3D LDM, identificados através de revisão de literatura.

### - Ar-comprimido:

O bombeamento por ar-comprimido é uma solução amplamente utilizada para materiais com maior viscosidade, como argila, permitindo maior autonomia ao deslocar para o bico extrusor volumes maiores de insumo sem a necessidade de um êmbolo. Outra vantagem do uso do ar-comprimido é que a pressão pode ser ajustada manualmente de acordo com a viscosidade do material, controlando seu fluxo, sendo uma boa opção quando se deseja um sistema de extrusão direta. Nos sistemas de extrusão indiretos, a pressurização por ar comprimido permite a pausa da impressão 3D e abastecimento rápido apenas trocando o compartimento com material, sem comprometer a impressão.

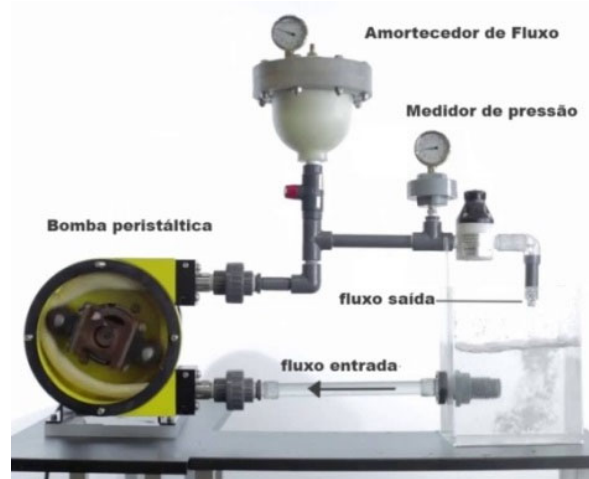


Figs118 e 119: Ar-comprimido

### - Bomba peristáltica:

A bomba peristáltica, também chamada bomba de mangueira é ideal para materiais com pouca viscosidade e funciona girando um cilindro preso a um rotor que ao empurrar o líquido dentro da mangueira, força seu movimento pela diferença de pressão criada. Como resultado do fluxo pulsante direcional do líquido, cria-se uma zona de sucção e outra de descarga. Com uso de amortecedores de pulso, consegue-se uma estabilização e continuidade no fluxo. O emprego da bomba peristáltica para uso em impressão 3D permite um sistema hermético, livre de contaminação, podendo a mangueira ser trocada ou descartada. A bomba peristáltica é uma boa opção para uso com impressão 3D de alimentos pastosos,

que necessitam um meio livre de contaminantes, ou mesmo esterilização, como chocolate e outros materiais com maior fluidez.



Figs.120 e 121 Bomba peristáltica

#### - Bomba de cavidade progressiva, ou transportadores helicoidais:

Criada por René Moineau nos anos 1930, a bomba de cavidade progressiva consiste em um rotor helicoidal que gira dentro de um compartimento hermético chamado estator, deslocando o material em uma direção. A bomba de cavidade progressiva, diferentemente dos dispositivos baseados em parafusos de Arquimedes, cria um deslocamento positivo constante, com entrega confiável do volume previsto independente da temperatura e da viscosidade do material, sendo indicada para materiais com viscosidades variadas, contemplando desde argila até concreto.

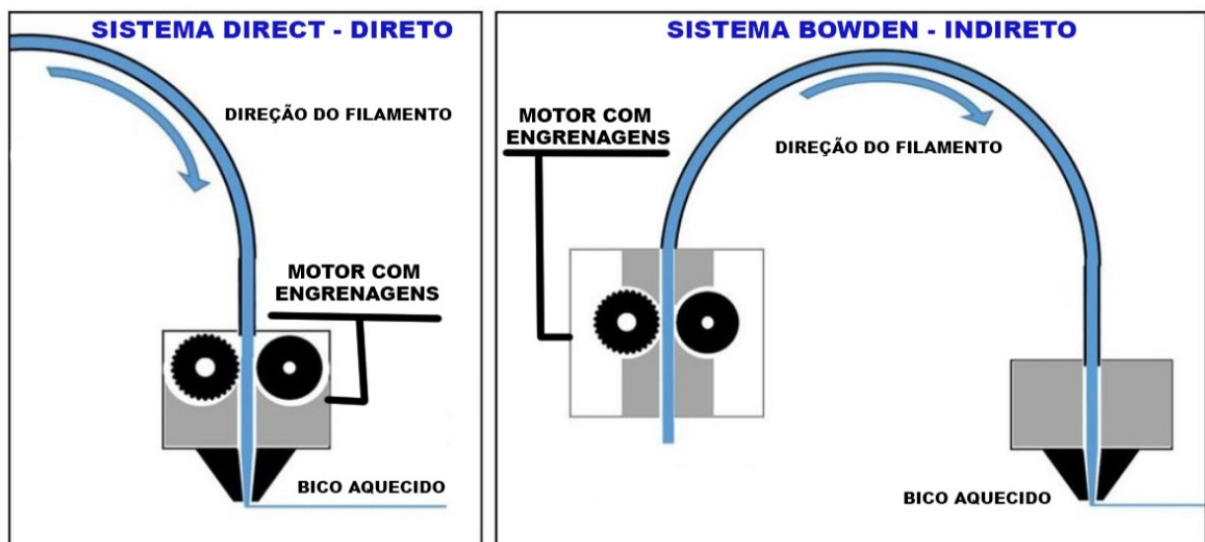


Figs.122 e 123: Bomba de cavidade progressiva

### 3.3.1. Tipos de sistema extrusor para LDM

#### - Sistema direto e indireto:

Outra característica dos extrusores LDM que também os aproxima dos utilizados em fusão de filamento trata da localização do mecanismo que direciona o insumo para o bico extrusor, podendo ser direto ou indireto. Utilizando como exemplo comparativo, em uma impressora FDM com extrusor direto, o mecanismo de extrusão, composto pelo motor e bico extrusor se movimenta por completo. No sistema indireto, conhecido como bowden, o mecanismo de extrusão é separado em duas partes, sendo uma fixa e outra móvel. Ao separar o motor do bico extrusor, no sistema bowden, há uma redução importante de peso da parte móvel. Com menos inércia as vibrações do conjunto são reduzidas, permitindo maior velocidade de impressão. Se por um lado, o sistema bowden possibilita maior velocidade de impressão, por outro lado, ele torna mais complexo o uso de alguns materiais e técnicas como retração do fluxo de material, especialmente para os polímeros flexíveis.

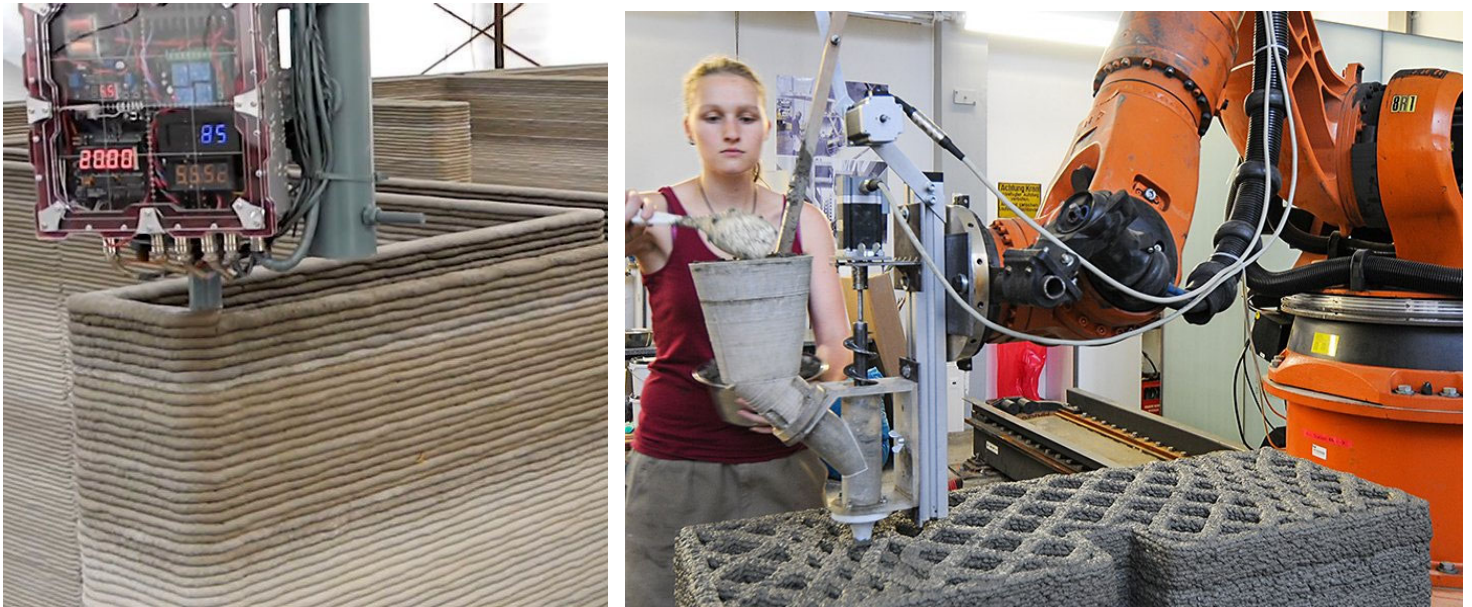


Figs.124 e 125: Sistema direto e indireto

Nas impressoras LDM, os sistemas de extrusão diretos e indiretos também são utilizados e funcionam de forma semelhante ao presente nas impressoras FDM. No sistema direto, o bico extrusor possui um pequeno reservatório acoplado que controla o fluxo automaticamente, permitindo maior precisão e controle. Em materiais mais flúidos como argamassa e concreto é possível fazer adição de



misturas durante o processo de impressão. A desvantagem do sistema extrusor direto se deve à maior complexidade do maquinário e peso, uma vez que o reservatório, mesmo que pequeno, se movimenta junto com o bico. Como consequência, o material deve ser cuidadosamente dosado, medido e testado antes de iniciada a operação. No modelo de extrusor direto, a velocidade de impressão costuma ser menor.



Figs.126 e 127 - Sistema de extrusão direto: concreto fluindo de maneira controlada

Já no sistema indireto, a extrusão é controlada pelo mecanismo de bombeamento que não se movimenta, nem recebe informações do sistema lógico, levando o material pastoso através de um tubo flexível até o bico extrusor móvel. O fluxo de extrusão é contínuo e controlado manualmente por uma válvula de acordo com a densidade do material, diâmetro de saída do bico e velocidade de impressão. Como vantagem, o uso do sistema direto simplifica o processo de automação uma vez que apenas a movimentação do bico extrusor é considerada no código G (linguagem da máquina). O sistema indireto pode ser aplicado em modelos nos quais a construção possa ser feita de forma contínua, sem interrupções, ou seja, sem que haja a necessidade de movimentar o bico por espaços vazios, uma vez que a interrupção de fluxo nesse sistema pode acarretar em variação na quantidade de material. Nos softwares de fatiamento, a ferramenta de impressão em modo contínuo, onde uma única camada é aplicada é conhecida como “modo vaso”.



Figs.128 e 129 – Sistema de extrusão indireto: concreto fluindo com velocidade constante

### 3.3.2. Mecanismos extrusores para LDM

Após a formulação do insumo e seu transporte por bombeamento, o material é finalmente depositado em camadas na etapa de extrusão. No ambiente de manufatura industrial, existem diversos tipos de válvulas extrusoras para uso em diversas finalidades como aplicação de adesivos colantes e pastas em placas de circuitos impressos, por exemplo. Devido à necessidade de desempenho, confiabilidade, precisão e resistência a insumos abrasivos, essas válvulas extrusoras são feitas sob demanda específica para o uso em projetos de maquinário diferentes das impressoras 3D, justificando o elevado preço desses equipamentos.



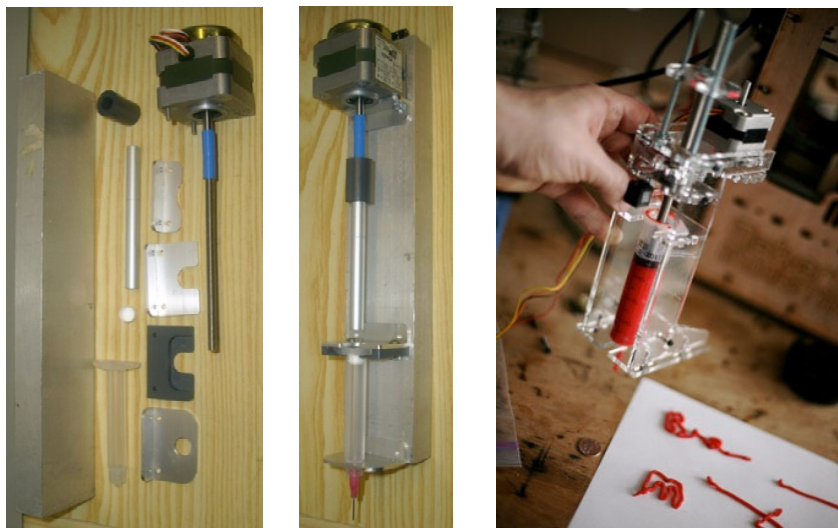
Figs.130 e 131: Válvulas extrusoras industriais

Em pesquisa no repositório do site [www.reprap.org](http://www.reprap.org), foram identificados os principais métodos utilizados para extrusores para LDM baseado em projeto open source de baixo custo. Apesar das diferenças entre máquinas extrusoras industriais (específicas) e impressoras 3D (genéricas), os princípios de

funcionamento dos extrusores para materiais pastosos ou líquidos coincidem, recaindo sobre as seguintes categorias:

#### - Extrusores tipo seringa e êmbolo:

Uma das primeiras demonstrações publicadas sobre o uso de extrusão de materiais pastosos em impressora 3D aconteceu no ano de 2009 através da empresa makerbot, com os projetos para impressão 3D de cobertura de cup cakes, intitulados frostruder MK1 e MK2. O MK1, que não chegou a ser comercializado, utilizava um êmbolo controlado por um motor de passo para pressurizar o material no interior de uma seringa.



Figs.132 e 133 Extrusores tipo seringa e êmbolo

#### **Vantagens:**

É uma solução simples, barata e fácil de montar, sendo compatível com a maioria dos softwares, e equipamentos eletrônicos baseados em projetos open-source para impressora 3D, podendo ser adotado facilmente em impressoras 3D FDM.

#### **Desvantagens:**

Perda de área imprimível: quando montado verticalmente, o dispositivo fica cerca de duas vezes o tamanho da altura da seringa, tornando sua adaptação em impressoras 3D baseadas em pórtico inviável pela impossibilidade de fabricar objetos mais altos. Já nas máquinas onde a mesa é fixa, ou se move apenas no eixo

z, esse problema não ocorre. Quando se adapta o motor ao lado da seringa, também há perda de área de impressão, só que no eixo X. Outra desvantagem diz respeito à limitação da quantidade de material, de acordo com o volume das seringas existentes no mercado. Esse tipo de mecanismo não livra o insumo de possíveis bolhas de ar, prejudicando o aspecto produto final. Outro inconveniente considerado crítico é a irregularidade no fluxo de material nos momentos de início e parada da pressão, fazendo com que haja uma quantidade maior de material. Em geral, os problemas aumentam principalmente em seringas com volumes maiores que 100ml. Além da imprecisão do fluxo, a necessidade de torque do motor aumenta para materiais com alta viscosidade como argila.

#### - Pressurizados por dispositivos pneumáticos:

Os extrusores que recebem pressão de ar comprimido podem funcionar de forma direta, como visto nos sistemas de bombeamento. O MK2, dispositivo extrusor de material pastoso desenvolvido pela Makerbot, funciona pressurizando o material no interior da seringa com ar comprimido, controlando manualmente o fluxo de acionamento e parada da extrusão através de duas válvulas solenoides. Válvulas solenoides são dispositivos de abertura e fechamento, controlados eletricamente por uma bobina interna. Esse sistema funciona bem em equipamentos industriais com eletrônica e mecânica específicas.



Figs.134 e 135: Pressurizados por dispositivos pneumáticos

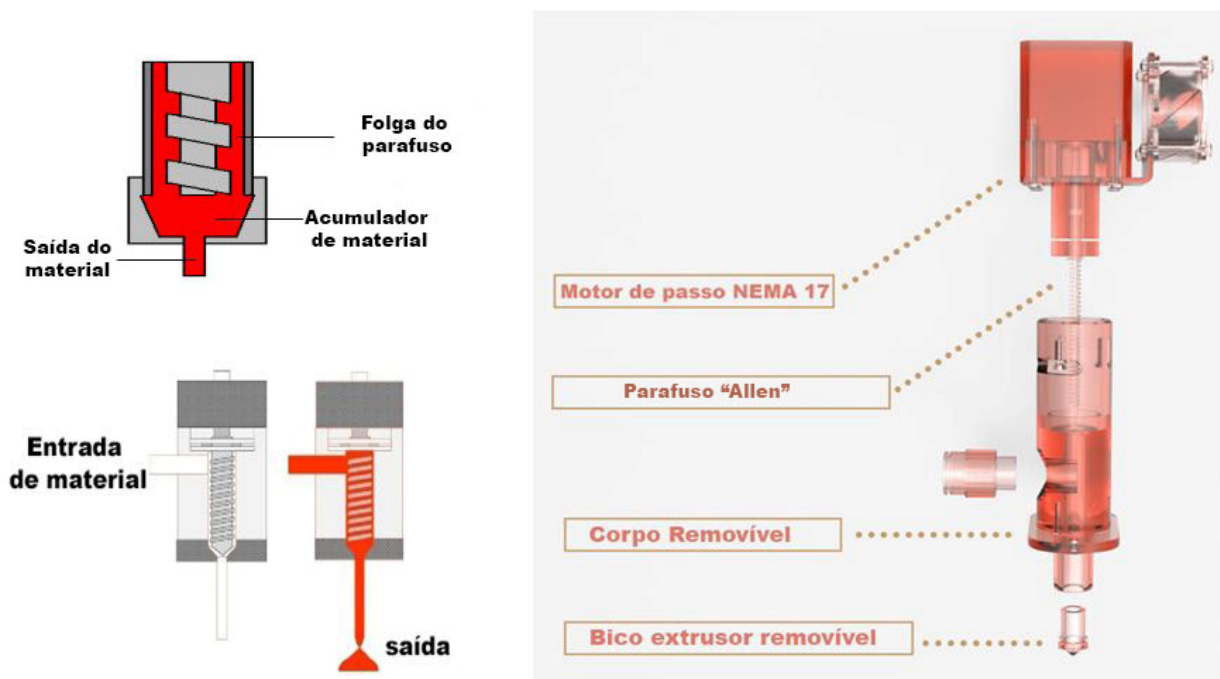
### Vantagens:

Dispositivo simples, fácil e barato para montar, o extrusor baseado em ar comprimido e válvulas solenoides, interrompe e libera o fluxo de maneira quase instantânea, sem apresentar inércia, é fácil de limpar e sua extrusão é livre de pulsações comuns em outros sistemas que utilizam bombeamento.

### Desvantagens:

A incompatibilidade com a eletrônica, software e mecânica das impressoras 3D de código aberto faz com que o controle de abertura e fechamento do fluxo seja desvinculado do código G. Além de depender de diversas variáveis para que o fluxo de material se mantenha conforme previsto, a necessidade de uma fonte de ar comprimido faz com que a operação seja barulhenta e o equipamento seja volumoso.

### - Bombeados por parafusos tipo Arquimedes:



Figs.136 e 137: Bombeados por parafusos tipo Arquimedes

Os extrusores diretos baseados em parafuso de Arquimedes funcionam girando um parafuso tipo allen (rosca infinita) no interior de um cilindro. Esse mecanismo controlado pelo código G permite liberar e interromper o fluxo de acordo

com a informação recebida, funcionando como uma válvula. Ao receber o material, a rosca em seu movimento giratório o empurra em direção ao bico extrusor, criando pressão de saída e permitindo uma extrusão livre de bolhas de ar. A empresa fabricante de impressoras 3D LDM, como a WASP, desenvolveu um extrusor específico para argila com esse mecanismo.

### **Vantagens:**

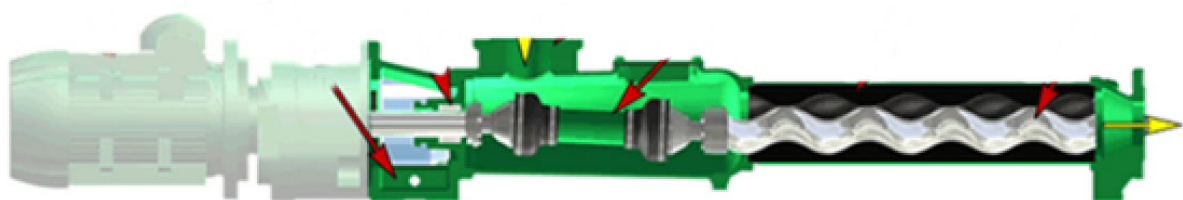
Esse tipo de extrusor é fácil de montar, programar e limpar, permite a parada e liberação do fluxo de maneira precisa, principalmente nos materiais de menor fluidez.

### **Desvantagens:**

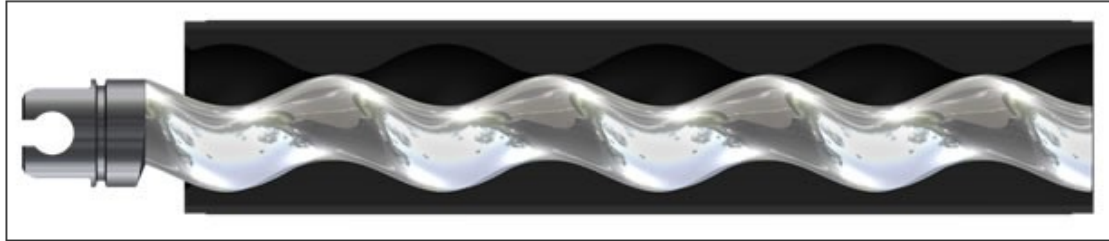
A alta viscosidade de materiais como a argila, por exemplo, requer parafusos mais resistentes à abrasividade causada, justificando o custo elevado de alguns extrusores desse tipo utilizados na indústria. A quantidade do fluxo de material varia de acordo com a viscosidade do material, fazendo com que ajustes frequentes precisem ser feitos antes de cada impressão. Outra desvantagem é a limitação de uso apenas com materiais mais densos.

### **- Bomba de cavidade progressiva:**

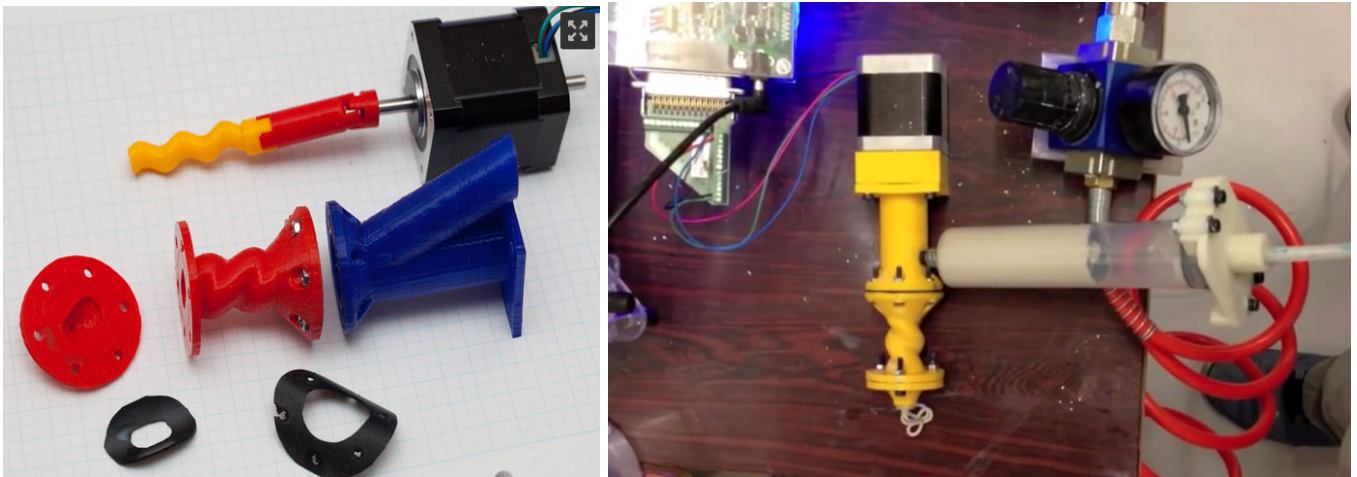
A bomba de cavidade progressiva funciona de maneira parecida com o parafuso de Arquimedes e conforme descrito anteriormente, entrega uma quantidade previsível de material independentemente da sua viscosidade. Nos extrusores, as bombas de cavidade progressiva possuem tamanho reduzido seu funcionamento depende de um motor para girar o eixo, uma entrada de material e uma saída para o bico extrusor. O fluxo de entrada de material nunca deve ser menor que o da saída e pode ser obtido utilizando êmbolo, ar comprimido ou outra bomba de cavidade progressiva.



Standard Rotor



Long Step Type Rotor



Figs.138 -142: Bomba de cavidade progressiva

### Vantagens:

Simple, de baixo custo, quando feita por impressão 3D e fácil de montar, suas peças podem ser feitas com impressão 3D utilizando materiais mais resistentes como o Petg, Nylon e co-policarbonato. As cavidade do compartimento estático (estator) funcionam como uma bomba de pistão infinita, gerando previsibilidade mesmo em materiais de baixa viscosidade. Outra vantagem é que esse tipo de extrusão não necessita obrigatoriamente do uso de ar comprimido.

### **Desvantagens:**

A altura do dispositivo montado é um inconveniente para uso em impressoras desktop do tipo cartesiano.

### **3.4. Classificação dos materiais e equipamentos**

A impressão 3D de materiais pastosos, conforme mostrado, se torna complexa devido à grande variedade de materiais com diferentes propriedades. A lista abaixo identifica alguns dos materiais mais utilizados, associando-os com os dispositivos mais apropriados para que o sistema seja montado e opere de maneira previsível, totalmente automatizado. Os dispositivos foram categorizados em modalidades desktop e industrial.

#### **3.4.1. Dispositivos *Desktop***

##### **- Material Argila e outros com viscosidade alta:**

<b>armazenamento</b>	<b>bombeamento</b>	<b>extrusão</b>
Seringa até 100ml	_____	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva
Recipiente até 1000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

##### **- Material concreto:**

<b>armazenamento</b>	<b>bombeamento</b>	<b>extrusão</b>
Recipiente até 5000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva	bomba de cavidade progressiva

##### **- Material pastosos com média viscosidade:**

<b>armazenamento</b>	<b>bombeamento</b>	<b>extrusão</b>
Seringa até 100ml	_____	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade



		progressiva
Recipiente até 1000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva, bomba peristáltica	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

**- Material para uso culinário (chocolate, etc.):**

armazenamento	bombeamento	extrusão
Seringa até 100ml	_____	Bomba de Arquimedes, seringa
Recipiente até 1000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva, bomba peristáltica (ideal)	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

**- Material pastosos com baixa viscosidade:**

armazenamento	bombeamento	extrusão
Seringa até 100ml	_____	Bomba de Arquimedes, seringa
Recipiente até 1000ml	bomba de cavidade progressiva, bomba peristáltica	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

**3.4.2 - Dispositivos Industriais**

**- Material Argila e outros com viscosidade alta:**

armazenamento	bombeamento	extrusão
Recipientes herméticos Maiores que 1000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

**Material concreto:**

armazenamento	bombeamento	extrusão
---------------	-------------	----------

Recipientes maiores que 5000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva	bomba de cavidade progressiva
--------------------------------	--	-------------------------------

#### **Material pastosos com média viscosidade**

<b>armazenamento</b>	<b>bombeamento</b>	<b>extrusão</b>
Recipientes maiores que 1000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva, bomba peristáltica	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

#### **Material para uso culinário (chocolate, etc.)**

<b>armazenamento</b>	<b>bombeamento</b>	<b>extrusão</b>
Recipiente acima de 1000ml	Ar-comprimido, bomba de cavidade progressiva, bomba peristáltica (ideal)	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

#### **Material pastosos com baixa viscosidade**

<b>armazenamento</b>	<b>bombeamento</b>	<b>extrusão</b>
Recipiente acima de 1000ml	bomba de cavidade progressiva, bomba peristáltica	Bomba de Arquimedes, bomba de cavidade progressiva

### **3.4.3. Concreto para uso em impressora 3D: resultado de estudo prospectivo**

Em 2017, o autor cumpriu como aluno especial, duas disciplinas no mestrado stricto sensu PROFNIT – Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação. Como trabalho final da disciplina “Prospecção Tecnológica”, foi elaborado um estudo prospectivo sobre concreto para uso em impressora 3D que resultou em publicação no periódico “cadernos de Prospecção” e pode ser acessado no link:

<https://portalseer.ufba.br/index.php/nit/article/view/23203>

A prospecção tecnológica realizada neste trabalho resultou na captura de 39 depósitos de patentes que visam proteger invenções de concreto para uso em impressão 3D. A análise dos dados fornecidos pelas patentes coletadas indicou um aumento quantitativo dos depósitos nos anos de 2016 e 2017, com uma concentração de 79,49% da amostra considerada neste período, evidenciando um crescente interesse na referida tecnologia nos últimos 2 anos.

Tomando por base a análise das patentes recuperadas, é possível afirmar ainda que a China se apresenta como o grande centro de desenvolvimento de concreto para impressão 3D, detendo 89,74% dos depósitos de patentes consideradas relevantes nesse trabalho. Tal fato contrasta com a realidade de pesquisa deste tipo de tecnologia no Brasil, que não possui qualquer patente depositada no INPI. Por outro lado, percebe-se um contraste com o amadurecimento das pesquisas sobre concreto no Brasil que possui alguns centros de excelência na área. Diante disso, vislumbra-se um vasto campo de pesquisa no âmbito dos materiais cimentícios para uso em impressão 3D em pesquisas futuras.

### 3.5. Particle Bed 3D printing – Impressão 3D sobre camada de partículas

Além da categoria de impressão 3D em concreto por extrusão de material, detalhada anteriormente, será apresentada a segunda modalidade factível para manufatura aditiva para construção de peças grandes: a impressão 3D sobre camada de partículas.

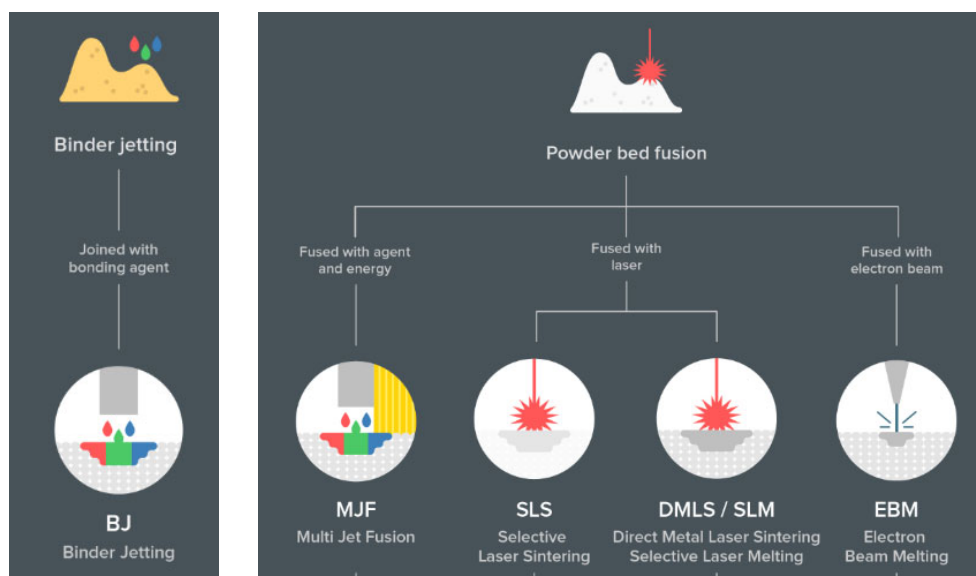


Figura 143: Categorias de impressão 3D Binder jetting e Power Bed Fusion. Fonte: 3dHubs.

Segundo a tabela de classificação elaborada pela 3DHubs, a impressão 3D utilizando camadas finas de material seco uniformemente distribuídas em uma superfície plana pode ser encontrada nas modalidades *Binder Jetting* e *Powder Bed Fusion* (fig 143). Apesar de semelhantes no princípio de distribuição das camadas, estas duas tecnologias se diferenciam nos tipos de material e na maneira como eles são seletivamente unidos. Embora pouco comum, o uso das impressoras compreendidas por *Power Bed Fusion*, pode ser aplicado na construção civil. Porém, o alto custo de produção, incluindo maquinário, e as pequenas áreas de impressão disponíveis limita a impressão 3D Power Bed Fusion à confecção de peças pequenas para uso principalmente como elementos de conexão. Feitos mais frequentemente com as tecnologias SLS e SLM. Esses elementos são normalmente utilizados em pavilhões temporários e em modelos reduzidos para pesquisa. Por outro lado, as impressoras 3D classificadas na tabela da 3D Hubs como *Binder Jetting*, tem se mostrado adequadas para uso na construção civil para fabricação de peças finais pequenas ou grandes, bem como moldes provisórios e definitivos, inclusive utilizando materiais cimentícios.

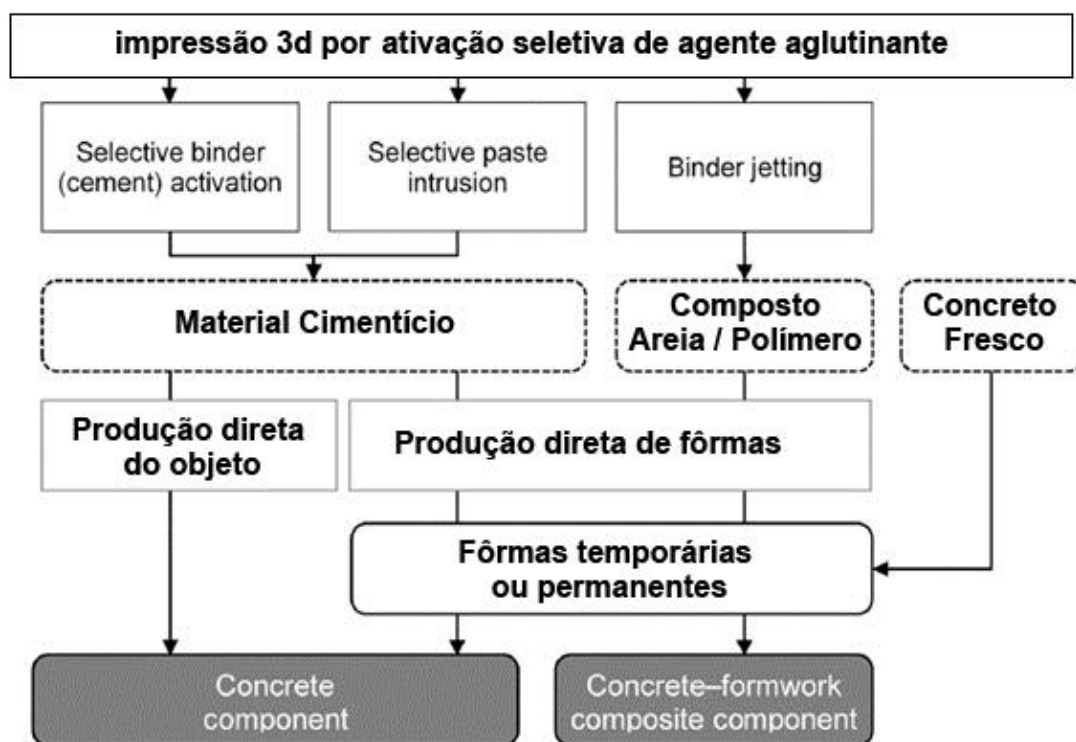


Figura 144: possibilidades das tecnologias de “particle bed printing” – adaptada pelo autor de (LOWKE, et al. 2018 P. 2.).

Levando em consideração a manufatura aditiva inserida no ambiente da construção com materiais cimentícios, foi sugerida a colocação da categoria *Binder Jetting* como subgrupo da impressão 3D por ativação de agente aglutinante (figura 144). Desta forma, destacam-se 3 tipos de tecnologia que atendem às demandas encontradas na construção civil utilizando materiais cimentícios, podendo ser escolhidas de acordo com o tipo de objeto desejado. (LOWKE, et al. 2018, p. 1.).

**- Selective Binder (Cement) activation:**



Figura 145: Esquema com resumo da tecnologia e modelo impresso. fonte:d-shape

Podendo ser traduzido como **técnica de ativação seletiva por agente aglutinante**, a mistura do substrato contido nas camadas de material seco é composta por agregados finos com granulometria menor que 1mm, geralmente areia e um material aglutinante como o cimento, por exemplo. A ativação do material ocorre através de centenas jatos de mistura líquida com base em água sobre a camada plana, criando uma pasta de material cimentício de forma seletiva.



Figuras 146 e 147: impressora 3D da empresa D-Shape à esquerda e o momento da ativação seletiva do material (direita) fonte: (LOWKE, et al. 2018, p. 12,).

**- Selective Paste Intrusion:**

Absorção seletiva de pasta cimentícia

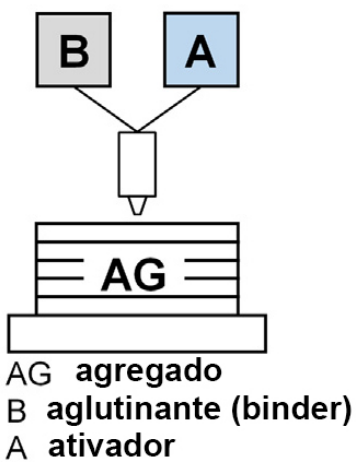


Figura 148 Esquema com resumo da tecnologia e bico extrusor depositando material pastoso.

No processo de intrusão seletiva, o material planejado sobre a mesa é composto apenas por agregados secos com diâmetro de até 5mm, sem a mistura de aglutinante. Podendo ser traduzida como absorção seletiva de pasta cimentícia, o princípio das camadas planas é utilizado, porém depositando sobre elas uma pasta de alta viscosidade composta por água, aglutinante e aditivos. Segundo Lowke, o sucesso da impressão por intrusão de pasta depende da sua capacidade para

preencher os vazios do material agregado e produzir peças com a resistência, definição e esperadas (LOWKE, et al. 2018, p. 5,).

Essa técnica emprega apenas um bico extrusor cujo caminho percorrido sobre o material segue a mesma lógica empregada nas modelagens por fusão de filamento FDM e por deposição de líquido, LDM. Na etapa de fatiamento a composição do modelo é feita utilizando camadas de base, de contorno, padrões de preenchimento e camadas de topo. É possível ainda, criar padrões de aplicação com escolha do sentido (dentro para fora, ou fora para dentro) e variação de velocidade e fluxo do material para maior precisão de “sangramento horizontal” nos contornos. Pode-se ainda mudar o diâmetro do bico extrusor facilmente, respeitando-se obviamente as características reológicas no material. Utilizando um bico de diâmetro menor, ganha-se precisão ao custo de maior tempo. Segundo Weger, a entrega de um resultado preciso depende da capacidade do material de preencher os vazios da camada verticalmente sem que ultrapasse horizontalmente os limites previstos no modelo digital (WEGER et al.2016)

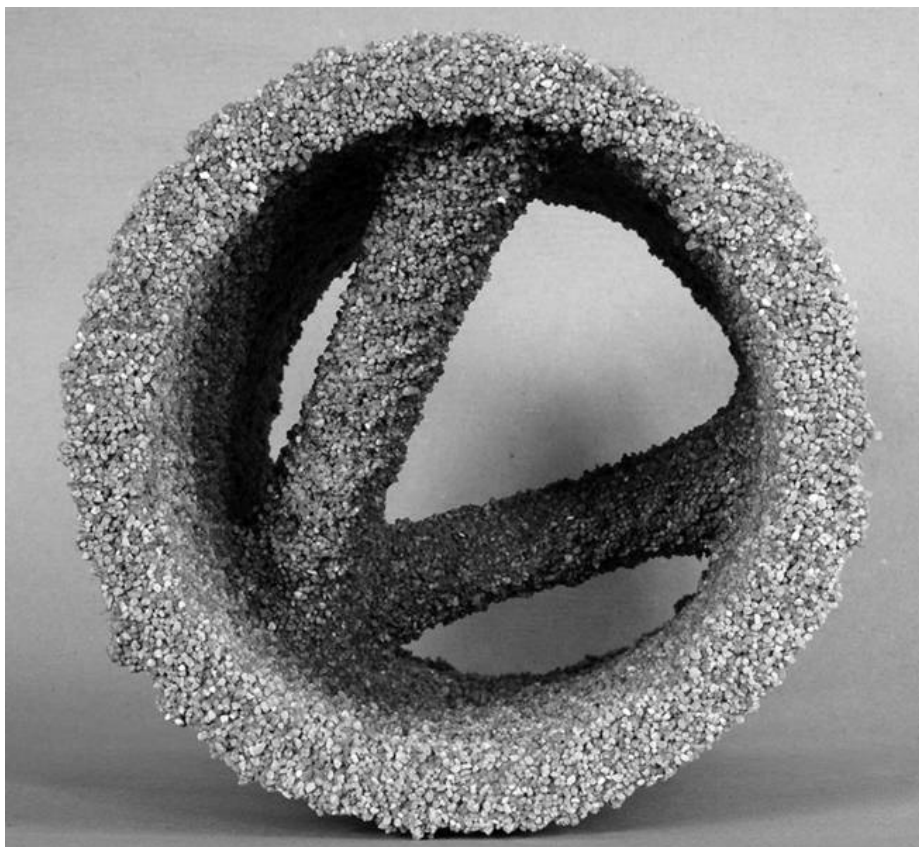


Figura 149: peça impressa por absorção seletiva de pasta cimentícia.

- *Binder Jetting*: jateamento de elemento aglutinante

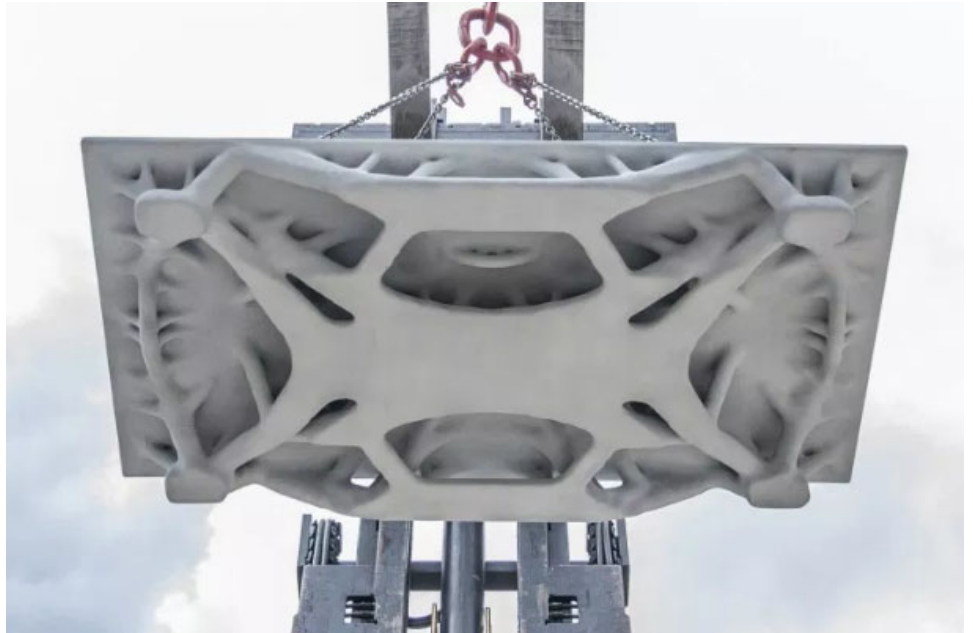
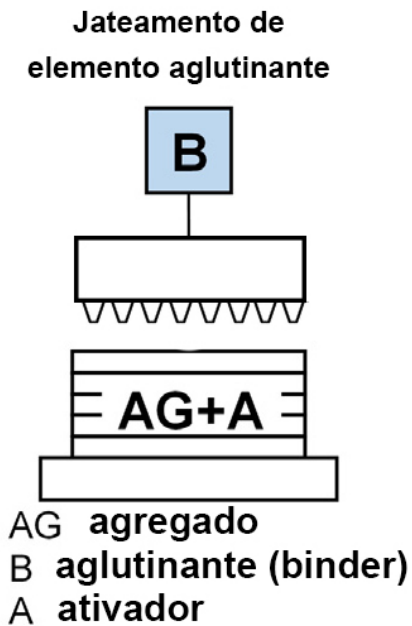


Figura 150: laje desenvolvida com impressão 3D, preenchida com concreto tradicional. Fonte: <http://dbt.arch.ethz.ch/project/topology-optimisation-concrete-slab/#jp-carousel-24883>

Na técnica denominada *Binder Jetting*, o material da camada é composto pelo agregado fino com a adição de um agente catalisador. O aglutinante utilizado, geralmente uma resina, é depositado por centenas de bicos sobre a camada, formando o objeto. A empresa VoxelJet utiliza essa tecnologia para fabricação de objetos pequenos e grandes área de construção de até 4m x 2m x 1m (LxPxA). Uma das vantagens da tecnologia de *Binder Jetting* está nas altas resoluções e nos materiais calcináveis para uso como moldes na indústria siderúrgica.



Figura 151 e 152: Molde para laje criado por otimização topológica e impressa em 3D utilizando Binder Jetting com partículas de areia. ETH Zurich Fonte: <http://dbt.arch.ethz.ch/project/topology-optimisation-concrete-slab/#jp-carousel-24889>



### **3.5.1. Considerações sobre impressão 3D por ativação seletiva de agente aglutinante.**

Fazendo um comparativo com a técnica para impressão 3D utilizando concreto em estado fresco desenvolvida pela *Contour Crafting* e utilizada comercialmente por diversas empresas, percebem-se vantagens em termos de melhor resolução e liberdade formal. A existência de material estável envolvendo toda a construção do modelo torna o uso de estruturas de suporte desnecessárias. “(...) Estruturas inclinadas, vãos livres, arcos, cavidades, vigas suspensas e beirais podem facilmente ser realizados” (LOWKE et. al. 2018 p.2,).

Ainda comparando com o projeto *Contour Crafting*, pode-se considerar como desvantagem a área reduzida, mesmo com as medidas do maquinário da empresa D-Shape e a necessidade de transporte das peças, que podem chegar a centenas de quilos. Percebe-se assim uma vocação absoluta para uso desta tecnologia em ambiente industrial na fabricação de peças que necessitem de alta resolução e complexidade formal. No entanto não se descarta a viabilidade dessa tecnologia dentro de um canteiro de obra, cujo espaço de fabricação pode ser preparado em alguma área disponível. Uma das grandes potencialidades observadas, no entanto está no uso para fabricação de moldes definitivos para concreto tradicional como feito pela ETH Zurich.

Em geral, a fabricação de maquinário para esse tipo de tecnologia possui custo mais elevado quando comparado com a 3DCP por extrusão de material. Sobre a necessidade de centenas de bicos, compostos por válvulas elétricas individuais recaem a maior parte da composição de preço do equipamento. No sentido de mitigar essa barreira, pesquisadores da universidade técnica de Munique, na Alamenha (TUM) desenvolveram a técnica de absorção seletiva de pasta cimentícia ,descrita nesse tópico. Pensando em termos de custo e na possibilidade de implantação desse tipo de equipamento no Brasil, essa solução, que mescla a impressão 3D LDM com a tecnologia de camadas finas de partícula em um reservatório se mostra como uma alternativa viável para aplicação em pesquisa nas universidades brasileiras.

### 3.6. Primeiras iniciativas: Meados dos anos 1990 até 2010

#### 3.6.1. Contour Crafting- Behrokh Khoshnevis:



Fig. 153: fonte: <https://www.3Dprintingmedia.network/contour-crafting-partners-dokan-ventures-3D-construction-printer-development/>

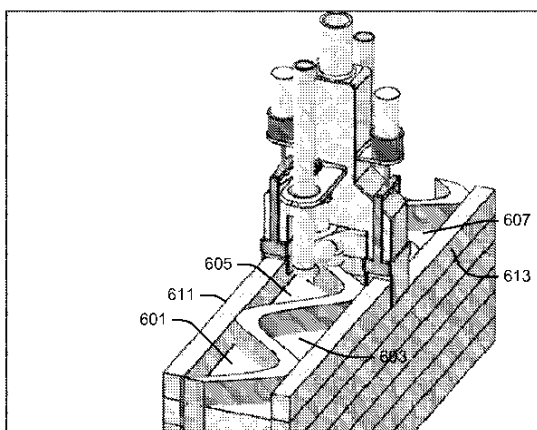


Fig. 154 e 155: Desenho industrial do extrusor patenteado com 3 saídas para concreto e da impressora 3D. Fonte: [https://patents.google.com/patent/US7874825B2/en?q=US+7874825+B2](https://patents.google.com/patent/US7874825B2/en?q=US+7874825+B2;);

A tecnologia *Contour Crafting* (CC), consiste em um sistema de impressão 3D para uso na construção de grandes peças de concreto. Sua estrutura compreende

um pórtico sobre trilhos que estabiliza o movimento de um guindaste, uma unidade de armazenamento e bombeamento e um bico extrusor com movimentação nos eixos X, Y e Z. Esse sistema possibilita a deposição de camadas sobrepostas de concreto de forma seletiva com controle computadorizado. O conjunto de patentes depositadas por Khoshnevis associa ao projeto CC uma ampla gama de itens, prometendo construir, ao menos em teoria, uma edificação completa com reforços estruturais, sistemas de água, esgoto e acabamentos como revestimento cerâmico e pintura de forma automatizada.

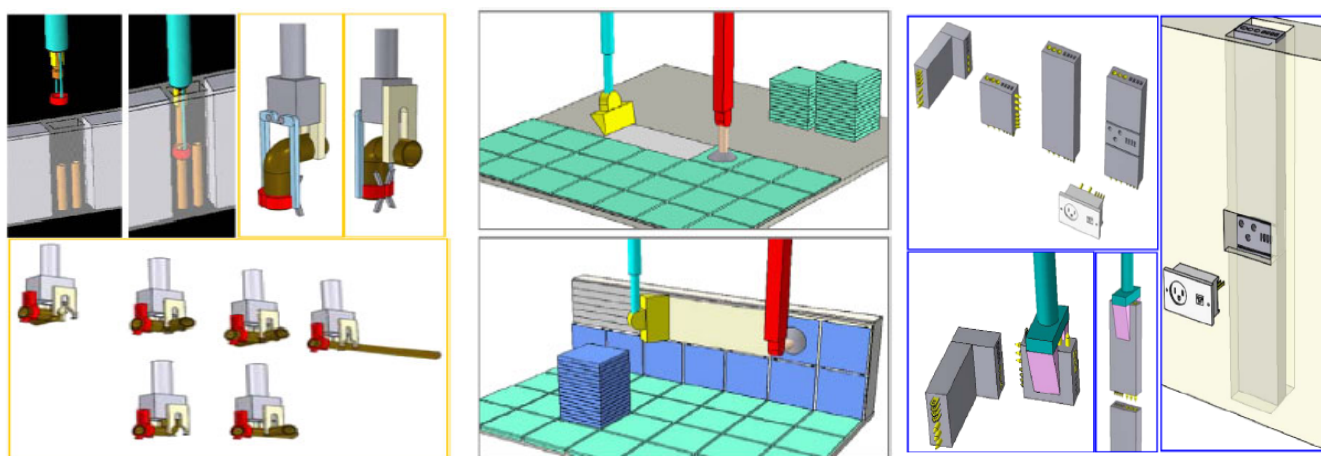


Fig. 156: detalhes do potencial desejado pelo projeto CC.

Mesmo não havendo registro de nenhuma edificação construída com essa tecnologia, o projeto CC é reconhecido no meio como a primeira solução viável para manufatura aditiva de peças para construção civil em larga escala (KAZEMIAN et al. 2017). Levando em consideração o trabalho de empresas com tecnologias similares, como a WinSun, a TotalKustom e a Apiscor, pode-se especular que a tecnologia CC deve ser capaz de imprimir ao menos as paredes, ou partes grandes de uma edificação. O protótipo do CC possui área de trabalho de 5mx8mx3m, cerca de 120m<sup>2</sup>.

Apesar da primeira iniciativa utilizando fabricação digital com argamassa ser creditada a Pegna (1997), o pioneiro da impressão 3D em concreto foi o professor de sistemas industriais e engenharia da UCS (Universidade do Sul da Califórnia), Behrokh Khoshnevis. Sua busca pela criação de objetos tridimensionais controlados por computador já vinha sendo feita desde meados dos anos 90 como pode ser verificado nas patentes US5529471A. Intitulada de *Additive fabrication apparatus and*

*method*, ela descreve um método de manufatura aditiva utilizando deposição seletiva de material fluido através de um bico extrusor auxiliado por uma espátula.

Essa invenção serviu como conceito para o primeiro protótipo do projeto CC. Outra invenção que teve patente depositada US09698541, no ano de 1999, intitulada “Sinterização por radiação”, que cria um método para impressão 3D em metal, ou cerâmica com o uso de calor para cura em forno apenas após a criação do objeto. Ainda em 1999 ele apresentou no simpósio internacional *Solid Freeform Fabrication*, na Universidade do Texas, um artigo intitulado “Contour Crafting – State of Development”. Nele, o princípio da tecnologia de modelagem por contornos é demonstrado em um protótipo de pequena escala com materiais termoplásticos, cerâmica e concreto.

U.S. Patent Jan. 25, 1996 Sheet 2 of 8 5,529,471

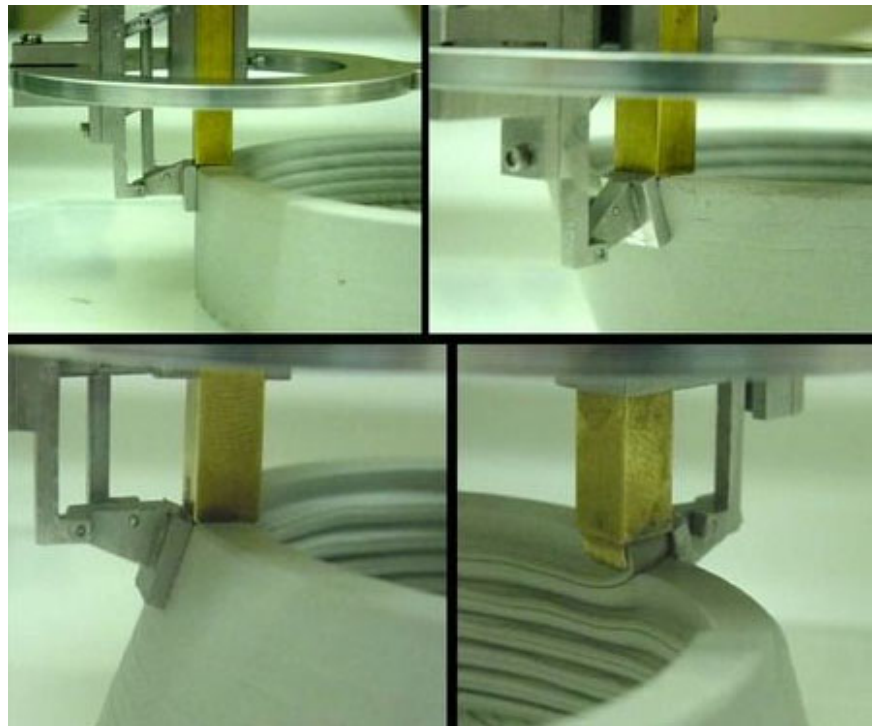
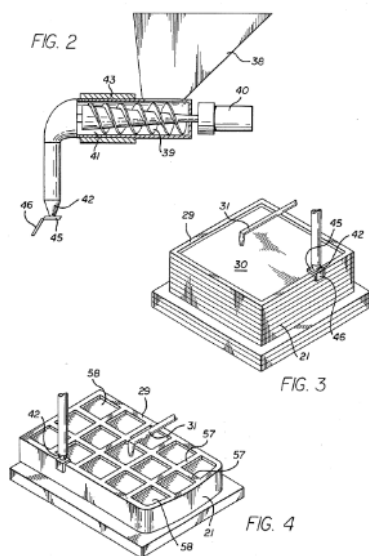


Fig. 157 e 158: detalhes em desenho industrial e protótipo da tecnologia CC adaptada para argila.

Nos anos seguintes, Khoshnevis continuou pesquisando, patenteando e desenvolvendo a tecnologia Contour Crafting. Em 2004, com a publicação do paper: *Automated construction by contour crafting—related robotics and information Technologies*, no conceituado periódico *Automation in Construction*, a tecnologia CC era oficialmente revelada de forma mais amadurecida. Em 2008, após a obtenção de recursos da companhia Caterpillar, houve ampla exposição na mídia. A presença

de Khoshnevis em eventos como TEDxTalks ajudou a divulgar o CC como uma solução para o déficit habitacional, desperdício de materiais, acidentes de trabalho, emissões de resíduos, dentre outras vantagens.

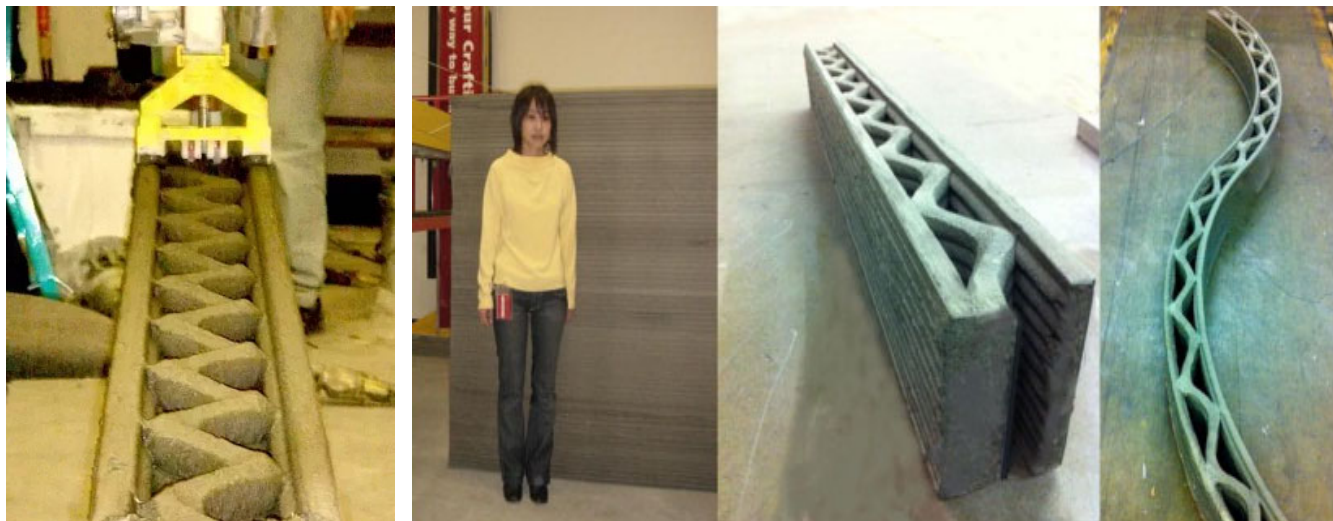


Fig. 159 a 161: resultados obtidos impressos em concreto pela CC.

Apesar de ter sido divulgado que a empresa Caterpillar passaria a comercializar impressoras 3D para uso na construção civil não foi encontrado registro de nenhum equipamento dessa natureza disponível para venda vinculada ao projeto Contour Crafting. Da mesma forma, nenhum resultado foi visto como produto entregue pela CC fora do ambiente acadêmico. Seja pela dificuldade com a legislação que regulamenta a construção civil americana, perfeccionismo ou mesmo como resultado de problemas um suposto uso não autorizado de patente por parte da empresa WinSun, se desconhece o real motivo pelo qual o pioneiro na impressão 3D em concreto foi ofuscado pelas empresas que se lançaram no mercado. O fato é que após o incidente com a WinSun, coincidentemente as atividades da CC acontecem de forma mais discreta. Por outro lado, conhecendo o histórico rico de invenções com dezenas de patentes depositadas e a grande rede de contatos de Khoshnevis, que inclui a agência espacial NASA, pode-se esperar que grandes feitos ainda estão por vir.

### 3.6.2 Totalkustom - Andrey Rudenko: a criação de uma impressora 3D para concreto como apoio do fórum do projeto RepRap.



Fig. 162: Castelo em escala reduzida impresso em concreto.

Após outubro de 2009, com a queda da patente **US5121329** que protegia a tecnologia FDM da empresa Stratasys, houve uma intensa movimentação no desenvolvimento de impressoras 3D por fusão de filamento. Dentre as diversas criações e adaptações feitas em vários lugares do mundo, um grupo de usuários do fórum da comunidade RepRap trabalhava intensamente na criação de impressoras de grande formato.

Ampliar o tamanho das impressoras 3D esbarra em questões técnicas limitantes como a dificuldade com o aquecimento da base de impressão, drivers compatíveis com motores mais fortes, estabilidade estrutural da máquina e insumo (filamento plástico) em rolos com quantidades maiores do que as normalmente disponíveis no mercado. Além disso, o custo para imprimir modelos com filamentos poliméricos de grande formato se torna um investimento relativamente alto. Foi levando em consideração esses fatores que o Arquiteto / Engenheiro Andrey Rudenko, Russo, naturalizado nos Estados Unidos, começou a projetar sua máquina de grande formato para uso com concreto. Após montar com sucesso sua primeira máquina FDM, ele iniciou o projeto e execução de uma impressora maior.

O fórum da comunidade RepRap, é um ambiente colaborativo onde os usuários se ajudam somando experiências. Essa natureza empírica foi importante para Rudenko pois sem a ajuda de outros usuários do grupo, sua primeira máquina, chamada de “StroyBot” talvez nem existisse. Entre julho de 2013 e dezembro de 2014, Rudenko postou 55 vezes no fórum da Reprap. Nesse registro, é possível acompanhar todo o processo de desenvolvimento de sua “concrete printer”. No tópico intitulado “3D Cement Printer”, Rudenko expõe suas vitórias e frustrações. O ambiente colaborativo, apesar de proporcionar avanços e “atalhos” para aqueles que se empenham, deixa uma lacuna quanto à propriedade intelectual das criações.

Mesmo sendo baseadas em patentes expiradas, ou tecnologias de código aberto, criações em colaboração podem gerar itens passíveis de registro como modelo de utilidade, e até mesmo uma patente de invenção, quando algo inédito é criado. Para Rudenko, o período de sua participação no fórum da RepRap alavancou oportunidades que culminou na empresa TotalKustom (<http://www.totalkustom.com/>). Nesse sentido, alguns trechos do tópico “3D Cement Printer”, criado por Rudenko foram separados:



Fig. 163: perfil de Andrey Rudenko no fórum da comunidade RepRap. Fonte: reprap.org

- **AndreyR (6 jun/ 2013):** “Estou prototipando uma impressora para concreto. Até agora, eu tenho a primeira versão com 1/3 do tamanho desejado e a maioria das partes finalizadas. Estou utilizando Arduíno e RAMPS como unidade controladora e drivers JM Massmind4, da Toshiba para conversão de sinais de comando em sinais de potência. Como software, estou utilizando o pronterface e o firmware Sprinter. No entanto, estou tendo alguns problemas e gostaria de ajuda. Agradeço antecipadamente!

1) Como eu consigo desabilitar a função de temperatura? Eu não precisarei de aquecimento para extrusão de concreto. Por hora, estou utilizando um ferro de solda para aquecer o sensor de

temperatura e iniciar a impressão. Eu poderia até utilizar uma resistência elétrica para tal finalidade, mas penso em me livrar da placa RAMPS, uma vez que o arduino mega 2560 me fornece os sinais de direção e passos dos motores.

2) Perguntas sobre escala e distância de movimento, até agora eu tenho 4m no eixo X e no futuro penso em ter 12m em X e 20m em Y. Me parece que o firmware sprinter não lida bem com esses números tão grandes, não me permitindo setar as distâncias que eu preciso. Como posso fazer isso?

3) Alguém desejaria me ajudar a desenhar um retângulo simples em CAD e converter para arquivo STL? Terei que fazer minha primeira impressão em breve e ainda falta muita coisa referente à parte mecânica como soldar, montar, etc e estou sem tempo para estudar CAD. Preciso de duas caixas simples como essa, abaixo, com uma caixa dentro da outra e espaço vazio entre as paredes. Eventualmente, numa casa de verdade teremos elementos de isolamento entre essas paredes.

- **bobc**: Qual o tamanho (diâmetro) do bico extrusor?

- **AndreyR**: 2cm até agora.

- **bobc**: Eu não conheço o Sprinter, mas tipicamente, os firmwares armazenam distâncias em micrometros numa memória de 32bits, o que te dá uma margem de cerca de 2m de alcance. Se você escalonar o valor global, será possível obter valores maiores, porém com uma perda de resolução, obviamente. Se você aumentar 100vezes a escala, a resolução será de 0.1mm (100micrometros) e o alcance subirá para 200m, o que seria suficiente...

- **AndreyR**: Seguem algumas fotos...

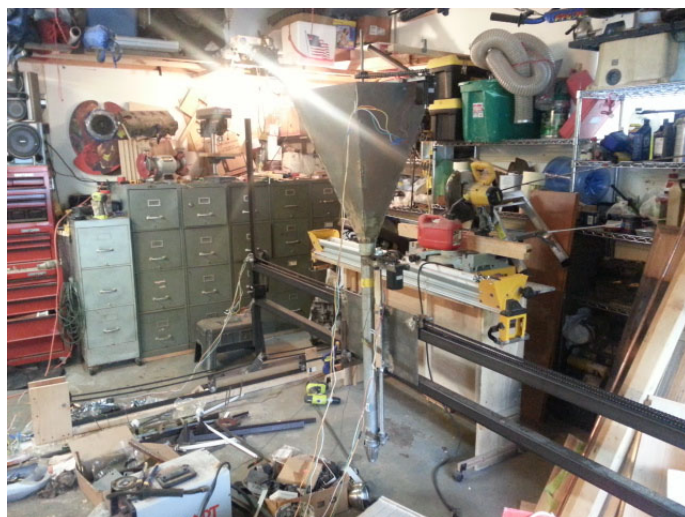
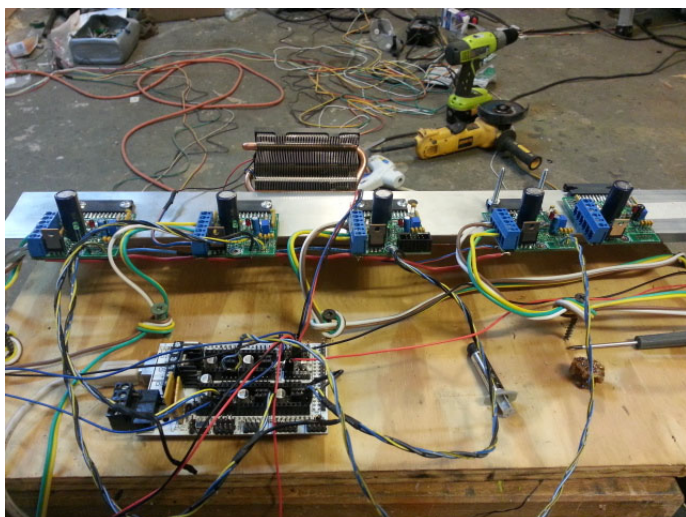


Fig. 164 e 165: primeiros avanços de Rudenko.

- **JamesNewton**: Nossa! Não posso esperar para ver funcionando. Será um bom peso sendo movido.

As versões mais antigas do sprinter funcionarão sem a conexão do termistor da extrusora. Eu estou usando a versão de 19 de abril de 2011 (não tenho certeza do número da versão) para testes, já que



eu não tenho uma extrusora. Pode haver recursos que você precisa em versões posteriores, mas vale a pena usar a versão mais antiga. Se isso não funcionar, você pode comparar as duas versões e criar a sua própria com o que deseja. Eu pessoalmente não entendo porque não pode ser configurado para aceitar 0 como a temperatura mínima. Naturalmente, a outra possibilidade é medir a voltagem no pino A2D do termistor quando ele está em temperatura e recriar essa voltagem com um potenciômetro como um divisor de voltagem para "falsificar" a saída atual do firmware.

- **AndreyR:** O que eu acabo de descobrir é que o Slic3r (fatiador) não aceita modelos em grande formato. Ele simplesmente trava. Não sei exatamente onde mudar essas setagens, no Merlin (firmware) ou no Slic3r.

- **y.doctt:** Tente o Kisslicer (fatiador). Ele é melhor. Você também pode dimensionar a escala de impressão juntamente com os passos do motor em passos /mm no marlin de maneira proporcional. Não estou certo como você irá calcular o fluxo de concreto, mas isso será algo que também deverá ser medido. Logo, tente utilizar o kisslicer. Eu acredito que será adequado para a questão.

- **AndreyR: (20 jun/ 2013)** A maior parte do meu tempo foi gasto montando Merlin e Slic3r. Demorou alguns dias para escalar meus arquivos para reduzi-los a 1000 x 500 x 250 mm. No kisslicer, escalar parece ainda mais difícil para mim. Lamentavelmente, se eu alterar muito o escalonamento, não vejo o caminho da impressão / o que estou imprimindo na janela do *pronterface*. Seria ótimo modificar este programa para me permitir fazê-lo. No entanto, vou listar o que aprendi: -Eu preciso de algum tipo de recurso de segurança caso os trilhos esquerdo ou direito estejam presos. Parece que eu preciso de um odômetro de algum tipo para contar o número de passos do lado esquerdo e direito. Eu poderia usar rodas dentadas mais um ímã mais um sensor, como ABS em um carro. E se os sinais esquerdo e direito não forem os mesmos, ele acionará um relé para cortar a energia. Eu já sofri até um acidente de carro porque uma das rodas travou. Alguma idéia de como eu posso fazer um contador / controlador? -Eu aprendi que os motores de passo, mesmo grandes motores, não têm muita energia em comparação com os motores DC. Eu tenho o Nema 42, 6 amperes, e mal chega para o protótipo. Na vida real, para a impressora de grande escala, é necessário 10 vezes mais energia, o que é realmente caro. Comecei a pensar em algum tipo de repetidor ou amplificador entre stepper e DC. No meu caso, preciso de uma velocidade estável e é melhor usar um motor DC. Alguém tem alguma idéia ou experiência usando DC para X e Y? Na vida real, durante o processo de construção de casas, eu preciso de cada camada para começar com o procedimento de homing. Esta é a única maneira de saber que a impressora não mudou devido ao vento, etc, durante o procedimento, e a casa não está torta. Como e onde posso conduzir essa configuração? -Depois da primeira impressão, decidi mudar o design da extrusora. Eu vou usar uma bomba e motores AC ou DC. Aqui, a primeira impressão e a extrusora precisam ser modificadas. Eu estava esperando isso e sei que a parte mais difícil desse projeto será construir essa extrusora. No entanto, a primeira impressão é muito emocionante para mim. Obrigado, e agradeço qualquer ajuda que vocês possam me dar.



Fig. 166 e 167: primeira camada impressa em concreto.

Rudenko continuou trabalhando intensamente nos meses de junho e julho de 2013, como ele já esperava, apesar das dificuldades com a montagem e setagem da máquina, um desafio ainda maior estava por chegar: a construção da extrusora e a formulação do material. Após vários meses de trabalho, Rudenko conseguiu construir uma extrusora baseada em bomba de cavidade progressiva com capacidade para distribuir o concreto de maneira estável em diversas velocidades. Mesmo assim, o resultado final não estava conforme o desejado. Para conseguir um acabamento uniforme, o concreto depositado nas camadas precisaria ser bombeado com uma redução no fluxo sincronizada com a redução de velocidade.

Após algumas dicas preciosas de usuários do fórum como *JamesNewton* e *A2*, Rudenko conseguiu o controle CNC do bombeamento e da extrusora e o domínio do software e para imprimir um castelo em miniatura. Em 30 de março de 2013, praticamente ao mesmo tempo em que a empresa chinesa Winsun divulgava ter construído 10 casas impressas em concreto em 24hs, Rudenko postou no fórum um vídeo que mostrava uma impressão com acabamento superior. Sobre a Winsun, Rudenko considerou que a informação sobre 10 casas impressas em 24 horas parece um tanto pretenciosa, uma vez que não foram divulgados detalhes como a quantidade de dias necessários para a cura do material e transporte das peças.



Fig. 168: evolução do método.

Nos primeiros dias do mês de agosto de 2013, Rudenko era notícia no mundo inteiro. Ele não foi o primeiro a imprimir estruturas em 3D utilizando concreto. Esta tecnologia já vem sendo estudada e desenvolvida por quase 2 décadas por Pegna (1997), Kohshnevis e sua equipe (início dos anos 2000), Enrico Dini – D-shape (2005), LoughBorough University (2007), dentre outros. No mesmo ano em que Rudenko concluía seu primeiro protótipo, outras iniciativas eram divulgadas a cada mês, como as casas impressas pela empresa chinesa WinSun. Apesar disso, o que diferencia o feito de Andrey Rudenko se deve à sua própria iniciativa, sem patrocinadores, utilizando ferramentas de código aberto e de forma colaborativa.

Ele extrapolou a escala das pequenas peças normalmente divulgadas em pesquisas, criando um pequeno castelo no quintal de sua casa. Rudenko sabia que estava em uma corrida pela primeira casa impressa. Meses antes de imprimir o castelo ele já teria condições de fazê-lo. Porém sua busca pela perfeição precisou de mais alguns meses até que ele finalmente desenvolvesse sua impressora com controle CNC de movimento e fluxo bem como a formulação ideal para o material. Em 2015, outro feito de Rudenko é noticiado.

Desta vez utilizando uma máquina mais moderna e maior ele imprime uma edificação de pouco mais de 130m<sup>2</sup>. Após o sucesso com o castelo e o hotel, Rudenko dedicou esforços em sua empresa, a Totalkustom que fabrica máquinas para venda e oferece serviço de impressão 3D em concreto.

### 3.6.3. FreeForm Construction - Loughborough University

Em 2003, foi criado o grupo de pesquisa *FreeForm Construction* na Universidade de Loughborough, no Reino Unido pelo pesquisador Rupert Soar. O objetivo era explorar o potencial de automação na construção civil utilizando a manufatura aditiva, resultando no termo denominado 3D Concrete Printing (3DCP). Cronologicamente a tecnologia 3DCP se firma no grupo dos pioneiros da impressão 3D em larga escala para construção civil, juntamente com o Contour Crafting e o projeto D-Shape.

O projeto ganhou força a partir de 2005 com o aporte de 1.2 milhão de Libras durante 4 anos, financiado pelo EPSRC, Engineering and Physical Sciences Research Council, através do IMCRC Innovative Manufacturing and Construction Research Centre, na Loughborough University (loughborough paper). Durante esse período o grupo, liderado pelo pesquisador Richard Buswell equipou o laboratório com uma máquina de grande escala, medindo 5.0m x 5.0m x 6.0m, baseada no sistema de pórtico sobre trilhos e operando em 3 eixos com sistema de bombeamento e extrusão CNC integrados. Desta forma, as pesquisas puderam ser desenvolvidas com diversos materiais incluindo o concreto.

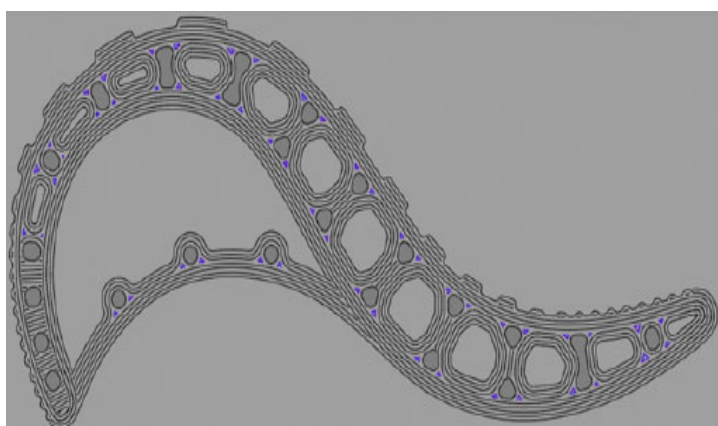


Figs. 169 e 170: Impressora 3D e protótipo do “wonderBench”.

Operando de maneira semelhante ao projeto Contour Crafting, porém sem o auxílio de um guindaste, a tecnologia 3DCP se diferencia deste por realizar uma impressão 3D de resolução superior, com saídas de 10mm x 6mm e 25mm x 15mm

(diâmetro x altura de camada) com melhor controle do resultado final em geometrias complexas.

Um dos protótipos em grande escala produzidos pelo grupo de pesquisadores da LoughBorough é o *WonderBench*, um tipo de estrutura de formato sinuoso composto de 128 camadas sobrepostas e medindo 2m x 0,90m x 0,80m. Essa estrutura apresenta algumas estratégias normalmente utilizadas nos elementos de concreto pré-fabricados como vazios que podem servir para finalidades distintas como reforço estrutural ou instalações, além de reduzir a quantidade de material e consequentemente o peso próprio. O *WonderBench* também dispõe de tirantes que tencionam a peça, criando uma protensão capaz de auxiliar na resistência da peça ao transporte e manuseio quando considerado o caso de uma fabricação em ambiente controlado.



Figs. 171 e 172: Detalhe dos tirantes de proteção e desenho de uma camada.

Entre 2010 e 2011, o grupo de pesquisadores da LoughBorough inovou ao utilizar o princípio da deposição de camadas curvas com o material concreto. Previamente identificado na modalidade de impressão 3D por fusão de filamento e denominada CLFDM, a deposição de camadas curvas por fusão de filamento opera com um tipo de fatiamento onde o eixo Z tangencia a superfície horizontal do modelo, evitando o escada. Essa abordagem serviu como resposta a algumas deficiências encontradas nos resultados obtidos com a tecnologia 3DCP para determinados tipos de modelos.

Mesmo com a alta resolução obtida pelo maquinário disponível, 6mm de altura para as camadas pode resultar em um aspecto parecido com degraus em uma superfície curva. Além do “efeito escada”, os pesquisadores verificaram que imprimir um objeto com camadas restritas ao plano horizontal consome mais tempo e resulta em um produto final com resistência inferior e imprecisão dimensional quando comparado ao mesmo produto impresso pelo método descrito.

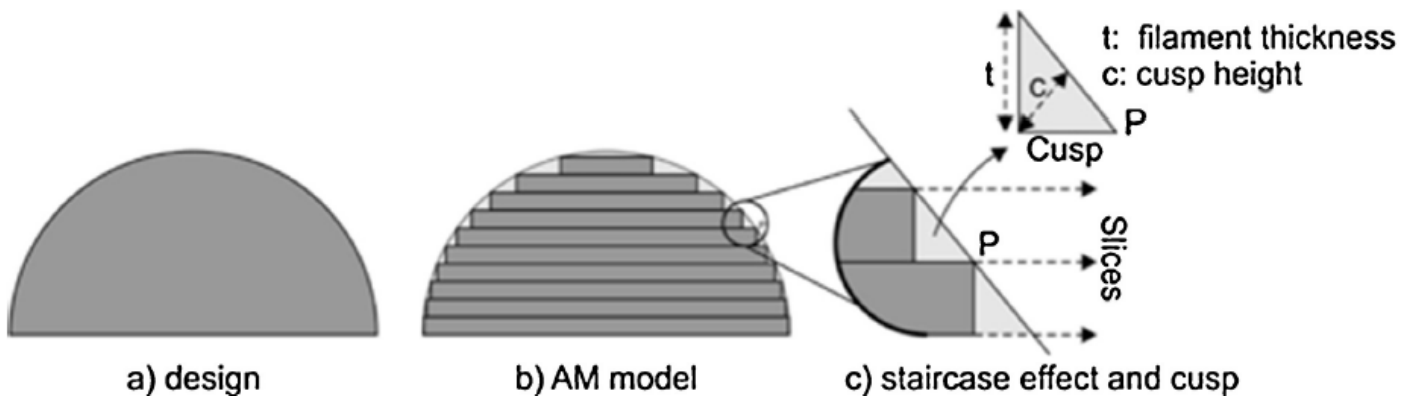


Fig. 173: Efeito “escada”.

Para provar a técnica, foi gerado um modelo composto por duas placas quadradas, medindo 1,5m x 1,5m, com superfícies curvas e sobrepostas de forma paralela, deixando um espaço entre elas, como um sanduíche com pilares internos. O modelo gerado em ambiente computacional NURBS (Non Uniform Rational Basis Spline) utilizando o software *Rhinoceros* com o plugin *Grasshopper*, foi desenhado para criar uma situação de complexidade formal adequada para uso dessa técnica. O princípio de deposição de camadas curvas é um método que encontra limitação quando utilizado em máquinas de 3 eixos, sendo mais apropriado para uso em equipamentos com 4 ou mais eixos.

Levando em consideração a limitação física do equipamento, os pesquisadores puderam determinar ainda na fase de projeto que as placas deveriam respeitar uma curvatura máxima e com isso utilizar uma abordagem diferente sem ter que modificar fisicamente o equipamento disponível.



Fig. 174: Exibição do painel com curvatura dupla no “Building Centre Exhibition” em Londres, 2011.

### 3.6.4. D-Shape – Enrico Dini



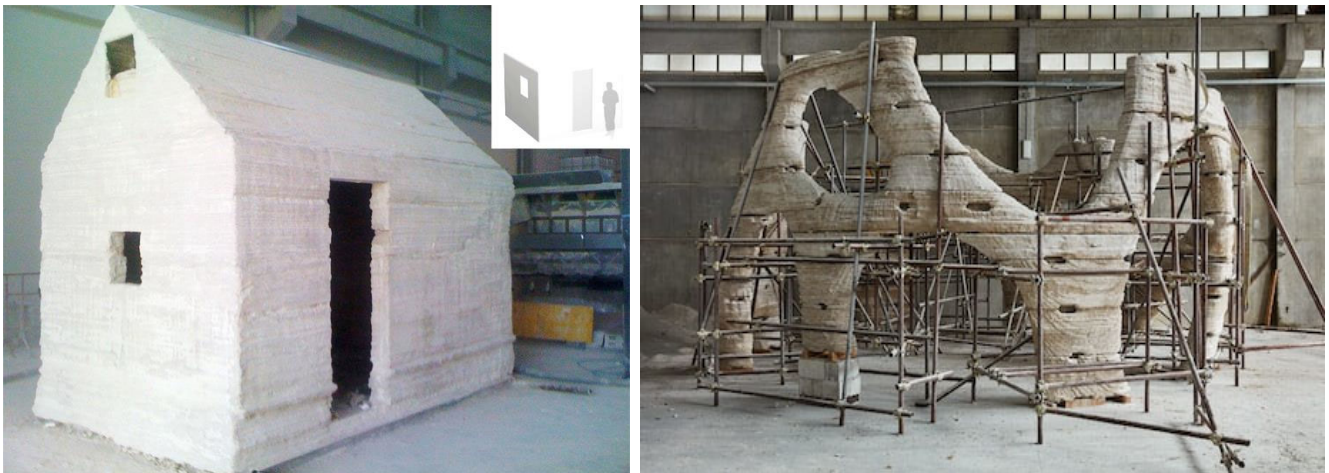
Figs. 175 e 176: Ambiente controlado da D-Shape e A peça Radiolaria. Fonte: <http://www.3dprinterworld.com/article/descent-into-genius-enrico-dini>

A tecnologia intitulada D-Shape consiste em um método para materializar objetos por deposição seletiva de um agente catalizador sobre uma superfície porosa composta por uma mistura de areia e óxido de magnésio como aglutinante. Trata-se de uma impressora 3D para concreto baseada em pórtico e com movimentação em 3 eixos. A patente CA2602071A1, creditada ao engenheiro civil Italiano Enrico Dini, com prioridade desde março de 2005, compreende um método e equipamento para construção automática de estruturas conglomeradas.

Categorizada como uma tecnologia de *Selective Binder Activation*, subgrupo da modalidade de impressão 3D conhecida como *Particle Bed 3D printing*, princípio de operação da D-Shape tem suas origens na tecnologia 3DP, inicialmente desenvolvida no Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT) em 1993 (patente US5204055A) e desenvolvida comercialmente pela empresa Z-Corp / 3D System como impressora 3D para objetos menores que 1m<sup>3</sup> feitos com material composto por gesso. Variações desta tecnologia utilizam de compostos de partículas finas de areia e sílica solidificadas com uma resina de formulação própria e conseguem imprimir objetos dentro de um volume máximo de 4m x 2m x 1m (LxPxA). (fonte: VoxelJet). As impressoras desenvolvidas pela D-Shape, apesar de ainda serem

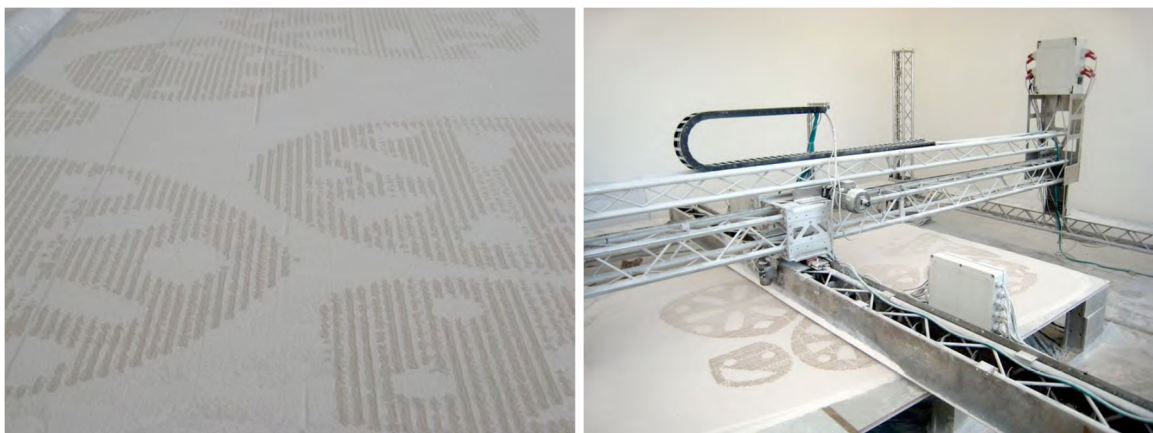


consideradas protótipos possuem volume de trabalho de 5m x 5m x 2,5m (LxPxA), podendo ainda ter a altura ajustada para 6 metros.



Figs. 177 e 178: Ferreti house e Radiolaria pavilion:

O princípio de funcionamento da tecnologia *Particle Bed 3D printing* se assemelha ao método utilizado nas impressoras equipadas com cartuchos para jato de tinta sobre papel. Ao invés de utilizar papel, as impressoras 3D que operam sobre superfícies com partículas compactadas criam uma sobreposição gradual de camadas finas de material em pó, distribuídas uniformemente por uma régua niveladora sobre uma base plana. A espessura das camadas informada pela D-Shape varia entre 5 e 10mm.

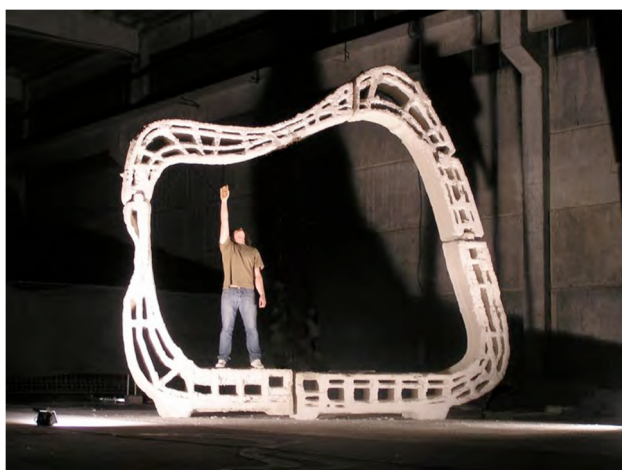


Figs. 179 e 180: Detalhe do método de impressão em duas passadas. Fonte: (GARDINER p..23 e 231, 2011)

Depois de criada a camada de material seco, um módulo de impressão composto por centenas de pequenos bicos, fixado em um pórtico, deposita um

líquido reagente (catalisador) nas áreas determinadas pelo código correspondente, gerado a partir do modelo 3D criado em ambiente virtual. Segundo Gardiner, essa deposição acontece em duas varreduras. A primeira passada deposita o agente catalisador na metade dos perfis do modelo, deixando linhas paralelas vazias de 10mm. A segunda passada, quando o pórtico retorna para sua posição de origem, preenche a outra metade dos perfis, finalizando a camada para que o processo seja repetido até a finalização do modelo.

Embora a tecnologia desenvolvida pela D-Shape tenha sido criada há mais de 10 anos, ela continua em desenvolvimento, não sendo vendidas unidades do seu maquinário até o momento. Um dos desafios é a obtenção de alta resolução e precisão dimensional. Os 300 bicos de injeção utilizados pela D-Shape entregam uma resolução nos planos XY de 10mm a 20mm. Isso significa que a espessura de linha mais fina possível, mas não recomendável, é de 1 centímetro. A solução para esse problema não depende apenas do aumento da quantidade de bicos injetores, mas da relação entre a granulometria e composição do material, viscosidade do líquido catalisador, espessura de camada e velocidade de impressão. Essencialmente, a D-Shape foi feita para imprimir peças grandes em um período de tempo aceitável pela indústria. A velocidade de impressão divulgada sugere a produção de 1,2m<sup>3</sup> por hora em camadas de 10mm de espessura.



Figs. 181 e 182 D-Shape: Resolução insuficiente para peças com encaixes precisos. Fonte: Gardiner pag. 270. Efeito escada evidente em planos inclinados. Fonte: (GARDINER p..259, 2011)

O processo de fatiamento de um objeto com essa tecnologia segue uma lógica diferente da praticada nas modalidades FDM e LDM. A deposição do agente

catalisador considera a geometria do objeto como sólida. Caso seja necessário vazios internos, paredes com espessura ou algum padrão de preenchimento, este deve ser previsto e modelado antes do fatiamento para impressão. Na impressão 3D em concreto por deposição de material pastoso, a geometria do objeto é criada considerando a construção de camadas de base, contorno, preenchimento e topo.

Ao final da impressão, o modelo fica totalmente coberto de material e sua remoção depende de trabalho de limpeza e coleta das partículas não aglutinadas para reaproveitamento em novas impressões. A remoção do modelo deve acontecer após 24 horas, tempo em que é atingida resistência desejada com cura do concreto.



Figs. 183 e 184: As áreas escuras correspondem ao local de depósito do agente catalisador. Processo de retirada do modelo finalizado.

Tal como idealizado pela Contour Crafting, a D-Shape parte do princípio da ampliação de escala de uma tecnologia existente, adaptando o material para uso na construção de estruturas de grande formato. Atualmente, a D-Shape é a única empresa a disponibilizar esse tipo de tecnologia, ainda protegida pelas patentes. A primeira máquina de Enrico Dini operava como uma máquina de *Binder Jetting* utilizando resina epóxi como agente catalisador. Esta solução encontrou alguns problemas e precisou ser aprimorada, para o que se classifica como *Selective Binder Activator*, substituindo a resina por uma solução baseada em água salinizada que ao entrar em contato com a mistura de areia e óxido de magnésio inicia uma reação química quase instantaneamente, gerando calor e solidificando apenas a área desejada.

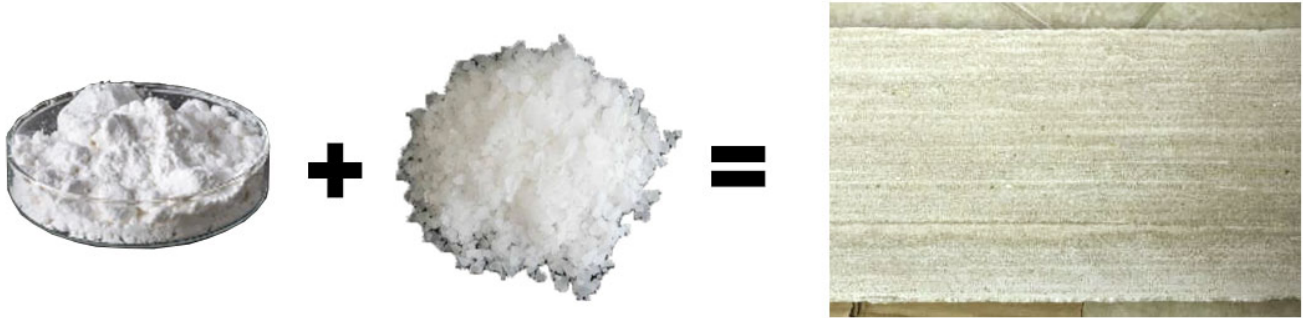


Fig. 185: a formulação do concreto magnesiano compreende óxido de magnésio MgO Em conjunto com o Cloridrato de Magnésio + água ( $MgCl_2 \cdot (H_2O)_n$ ). fonte: montagem feita pelo autor

O material resultante da formulação de areia, óxido de magnésio e água salinizada é um tipo de concreto conhecido como concreto magnesiano, sendo este o material regularmente utilizado pela D-Shape. Embora os resultados divulgados pela D-Shape sejam feitos com concreto magnesiano, a tecnologia desenvolvida por Dini permite o uso de outros materiais, inclusive de compostos com cimento Portland que pretendem ser utilizados de maneira mais intensiva pela empresa.



Fig. 186: Modelos impressos de corais para pesquisa em habitat marinho. (GARDINER p.337, 2011)

O concreto magnesiano impresso pela D-Shape possui o aspecto de uma rocha com coloração bege clara, tendo sido utilizado em muitos projetos que tiraram partido dessas características, bem como da boa resistência à compressão de cerca de 59mpa (paralela) e 49mpa (perpendicular), com pequena variação anisotrópica. Algumas vantagens atribuídas ao concreto magnesiano são a cura sem necessidade de água, alta resistência ao fogo (sendo comum seu uso em refratários), bom desempenho como isolante térmico, boa resistência à abrasão, tempo de cura pequeno e excelente aderência entre camadas, quando impresso em 3D. Os modelos da D-Shape utilizando esse material se mostraram favoráveis para o uso em arrecifes artificiais, tanto pela possibilidade de formas livres, quanto pelo Ph neutro, tornando se adequado para o crescimento de fauna e flora marinhas. (GARDINER, p.299, 2011).

Embora em muitas situações as características do concreto magnesiano o torne um material favorável ele também possui pontos negativos que limitam seu uso na construção civil. Ele apresenta redução no seu desempenho estrutural quando submetido à exposição prolongada em água e sua composição é corrosiva aos metais, não sendo recomendado seu uso com armações de aço, tradicionalmente utilizadas. Além disso, é um material de comportamento imprevisível expandir, retrair, trincar e empenar.

O pioneirismo da tecnologia D-Shape, com patentes ainda em vigência a coloca como um importante player dentro da manufatura aditiva para em concreto. Algumas características observadas sugerem uma utilização dessa tecnologia mais voltada para as áreas de formas livres, com potencial uso em paisagismo, esculturas mobiliário urbano e fôrmas complexas para uso em conjunto com concreto convencional, embora provado seu potencial na impressão de uma ponte para pedestres e uma pequena casa de design arquitetônico um tanto óbvio. O início do uso de cimento Portland pela D-Shape sinaliza uma nova fase de desenvolvimento. Espera-se assim, aprimoramentos que tornem a D-Shape ainda mais versátil e acessível.

### 3.7. IMPRESSÃO 3D EM CONCRETO: A SEGUNDA GERAÇÃO: 2010 – ATUAL

Conforme detalhado na tabela comparativa, percebe-se que após 2010 houve uma corrida tecnológica pela impressão 3D em concreto da primeira casa. Mesmo com o estágio de desenvolvimento da tecnologia Contour Crafting, nenhuma casa impressa foi divulgada. Em paralelo, algumas empresas e instituições de pesquisa pelo mundo avançavam na busca de resultados factíveis.

#### 3.7.1. Winsun



Fig. 187: casas montadas no pátio da empresa Winsun. Fonte: <https://www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture>;

Entre os anos de 2013 e 2014 os primeiros modelos de construções impressas em escala real começaram a ser divulgados. No início de 2014, a empresa chinesa WinSun recebeu grande visibilidade da mídia com a notícia sobre a impressão 3D de 10 casas em apenas 24 horas. As notícias provenientes da China nem sempre são confiáveis. De toda forma, sabe-se que perfis transversais das 10 casas que se encontram no pátio da empresa em Shangai foram pré-fabricados em ambiente controlado e montadas no local.

O processo de impressão 3D dessas peças em concreto provavelmente consumiu cerca de 30 dias e a montagem por encaixe, talvez 24h, pois não há registro de auditoria oficial que comprove esse tempo de construção, tão pouco se o

trabalho de revestimento, colocação de esquadrias, telhas e pintura está contemplado neste prazo tão curto. Caracterizadas por design simplório, a empresa divulgou o custo de produção do modelo com 200m<sup>2</sup> em aproximadamente U\$ 4.800,00. Também não se sabe se esse custo inclui todos os componentes, ou se refere apenas aos perfis impressos.



Fig. 188: fonte: <http://www.3ders.org/articles/20140401-10-completely-3d-printed-houses-appears-in-shanghai-built-in-a-day.html>;

Em entrevista ao jornal inglês *The Guardian* no ano de 2015, consta que o sucesso da empresa se deve em parte à quebra de patente creditada ao professor Behroch Khoshnevis, criador da Contour Crafting. Khoshnevis afirma que em 2013 recebeu a visita do diretor da WinSun, Ma Yihe, nas dependências do seu laboratório, na Universidade do Sul da Califórnia para conhecer seu trabalho. Meses depois o próprio Khoshnevis foi convidado para conhecer a Winsun e tirou pessoalmente algumas dúvidas técnicas sobre processos e composição de material. Ao retornar para os Estados Unidos, Khoshnevis não obteve nenhum retorno de Ma Yihe. Após esse período, a Winsun, uma empresa que fabricava elementos de arquitetura como painéis de gesso estruturado com fibra de vidro para uso em fachadas e interiores passou a divulgar que já trabalhava com pesquisa e desenvolvimento na área de manufatura aditiva desde 2008.

Após as primeiras casas, a Winsun continuou trabalhando e divulgou em 2016 e nos anos seguintes uma mansão de dois pavimentos com 1.100m<sup>2</sup>, um edifício de 5 andares que apesar de terem sido feitos com técnica mista (impressa e convencional), mostram o potencial da impressão 3D em concreto. Outro projeto que merece destaque são os escritórios feitos na China e montados em Dubai,

demonstrando que o transporte de peças grandes em concreto impresso também é possível. A Winsun divulga sua tecnologia com restrição de segredo industrial. Para fotos em close, o extrusor é coberto com uma lona cinza e os visitantes do showroom podem ver a máquina apenas por uma filmagem. A empresa divulga que sua máquina, baseada em pórtico com movimentação em 3 eixos, possui a maior área do mundo, medindo 6.6m x 10m x 150m.



Fig. 189: a mansão impressa parcialmente em 3D. fonte: <https://www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture>;

Planos ambiciosos de Ma Yihe inclui o estabelecimento da empresa em 20 países até 2020 fazendo da WinSun uma empresa fornecedora de tecnologia e não apenas prestadora de serviço.



### 3.7.2 - 4TU.Bouw

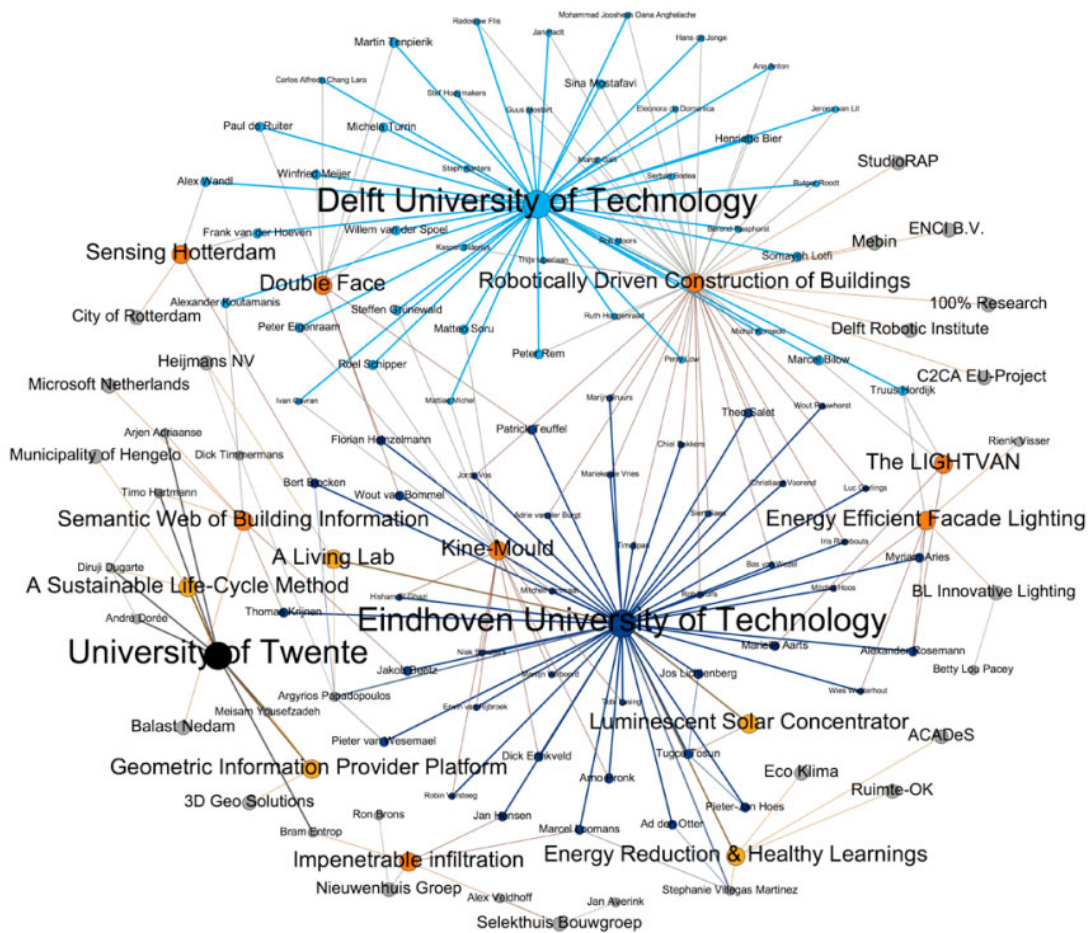


Fig. 190: rede de formada entre a academia e o setor privado. Fonte: <https://www.4tu.nl/bouw/en/LHP2014/>

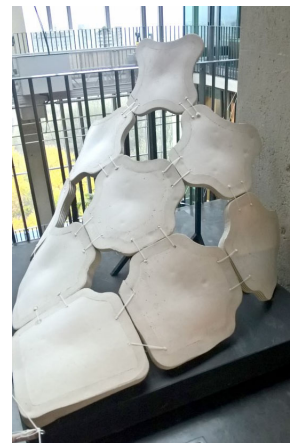
A 4TU.Bouw (4 universidades técnicas da construção), é um centro de excelência para o ambiente da construção criado como iniciativa de cooperação entre os departamentos das principais instituições de ensino, pesquisa e desenvolvimento tecnológico para construção da Holanda: Delft, Eindhoven, Twente e Wageningen. Juntos, os departamentos colaboram, concentrando esforços para aumentar a eficiência em ensino e pesquisa, bem como a competitividade no âmbito internacional. Dentre os objetivos deste grupo estão o desenvolvimento de um programa de pesquisa conjunta entre os departamentos de construção e o setor construtivo bem como a mudança da imagem da AEC (arquitetura, engenharia e construção) de tradicional para inovativa. A 4TU Bouw se configura não como uma instituição, mas como uma organização em rede com seus respectivos pontos

focais, utilizando as potencialidades de cada departamento de maneira estreita com empresas inovadoras do setor construtivo.



Figs. 191 e 192: Impressora 3D na TU Eindhoven, planos para construção de casas desde 2016.

#### - Double curved Concrete:



Figs: 193 a 195: kine mould e “double curved 3d concret printing” Fonte: <https://www.4tu.nl/bouw/en/LHP2014/kine-mould/>; <https://www.4tu.nl/bouw/en/LHP2016/Double%20Curved%203D%20Concrete%20Printing/>;

Os primeiros projetos envolvendo impressão 3D em concreto, fruto da parceria entre instituições datam de 2016. Buscando superar as limitações formais da manufatura aditiva 2.5D tradicionalmente utilizada, o time formado por pesquisadores da TU Delft e TU Eindhoven explorou as possibilidades da combinação entre a manufatura aditiva de formas livres, desenvolvida pela LoughBorough em 2011, com a *Kine-Mould* (2014), uma superfície flexível de silicone equipada com pinos que se movimentam verticalmente, criando ondulações em sua superfície controladas por código. Como resultado, foi possível imprimir camadas sobrepostas sem o uso de suportes sobre um molde reaproveitável e

customisável. Esta técnica ampliou as possibilidades para a fabricação digital em concreto, uma vez que grandes estruturas como painéis de fachada, ou estruturas complexas sequenciadas podem ser feitas ocupando uma pequena área dentro de uma indústria.

#### - Ponte para ciclistas *Gemert*:

Implantada em outubro de 2017 na pequena cidade de Gemert, na Holanda, a ponte como parte de um projeto de infraestrutura iniciado pela construtora belga BAM, a pequena ponte para ciclistas medindo 6.5m x 3.5m atravessa um pequeno canal. Composta por 6 segmentos de peças de concreto impresso, a ponte foi pré-fabricada no laboratório da TU Eindhoven, transportada e montada no local, recebendo cabos para protensão estrutural. Para que a utilização da ponte fosse liberada para o público, diversos testes foram feitos com modelos na escala 1:2, utilizando o concreto especialmente formulado para manufatura aditiva desenvolvido pela empresa Weber Saint-Gobain.

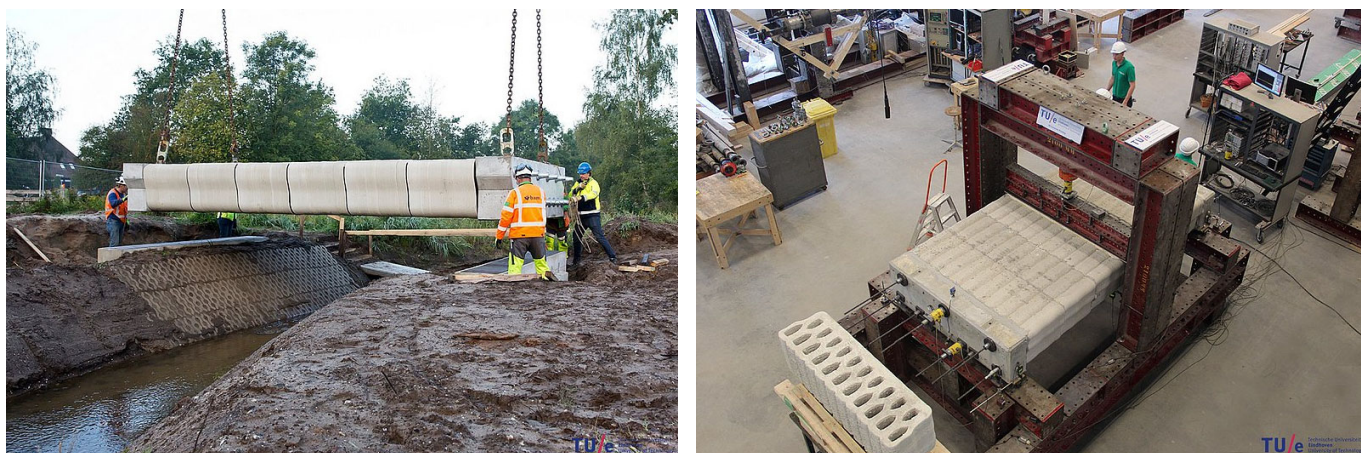


Fig. 196: Ponte para ciclistas: Fonte: <https://www.tue.nl/en/our-university/departments/built-environment/research/research-programs/structural-design/research/research-areas/concrete-research-areas/3d-concrete-printing/3dcp-projects/>

#### - Projeto de casas *Milestone*:

No início de 2019, como fruto do consórcio entre a BAM e a Weber Saint-Gobain, com o apoio da TU Eindhoven, foi inaugurada uma fábrica para impressão 3D em concreto na cidade de Eindhoven, na Holanda. Um dos projetos previstos é a construção de várias casas habitáveis em uma nova área residencial (Bosrijk) que promete ser um exemplo de sustentabilidade com início previsto para janeiro de 2019.



Figs. 197 a 199: Projeto de casas habitáveis e fábrica de 3DCP. Fonte: <https://3dprint.com/233981/worlds-first-house-3d-printing-factory-opens-in-eindhoven-netherlands/>

### 3.7.3- ETH Zurich

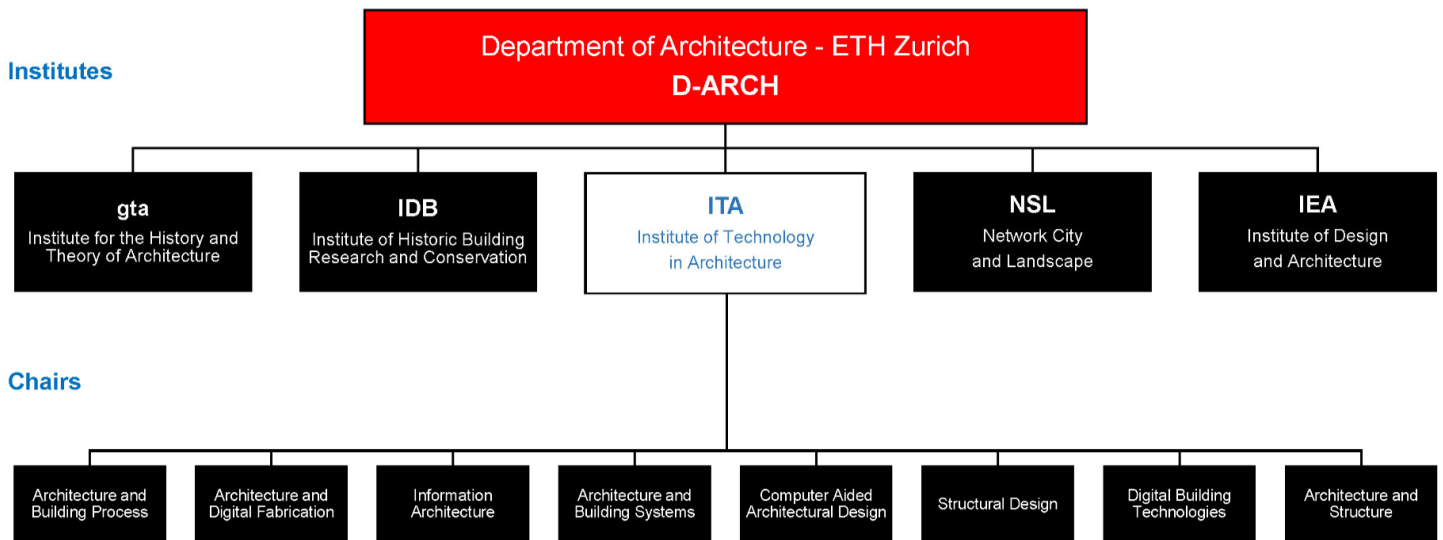
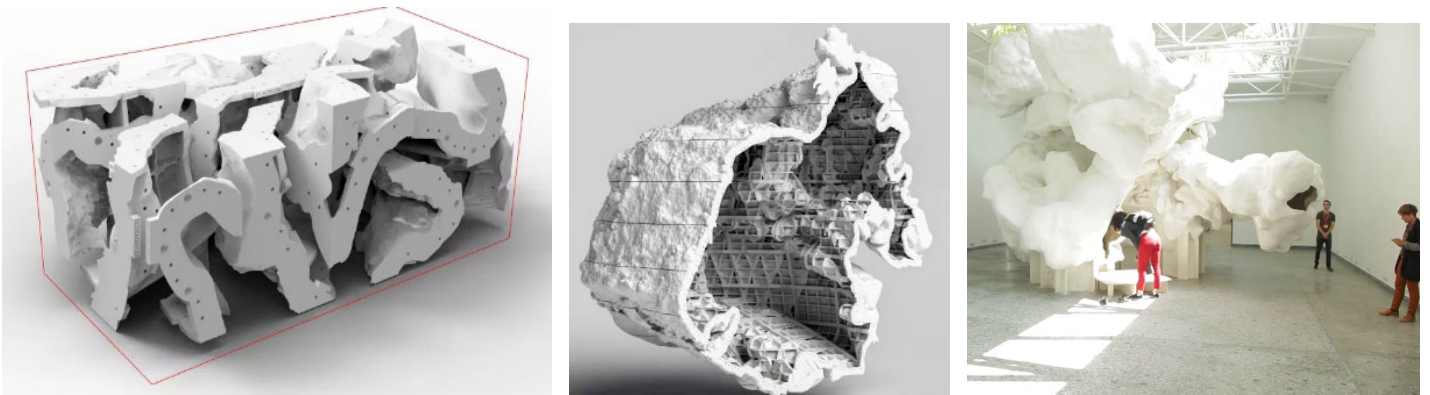


Fig 200: Organograma do D-ARCH. Fonte: <http://www.ita.arch.ethz.ch/the-institute/structure.html>

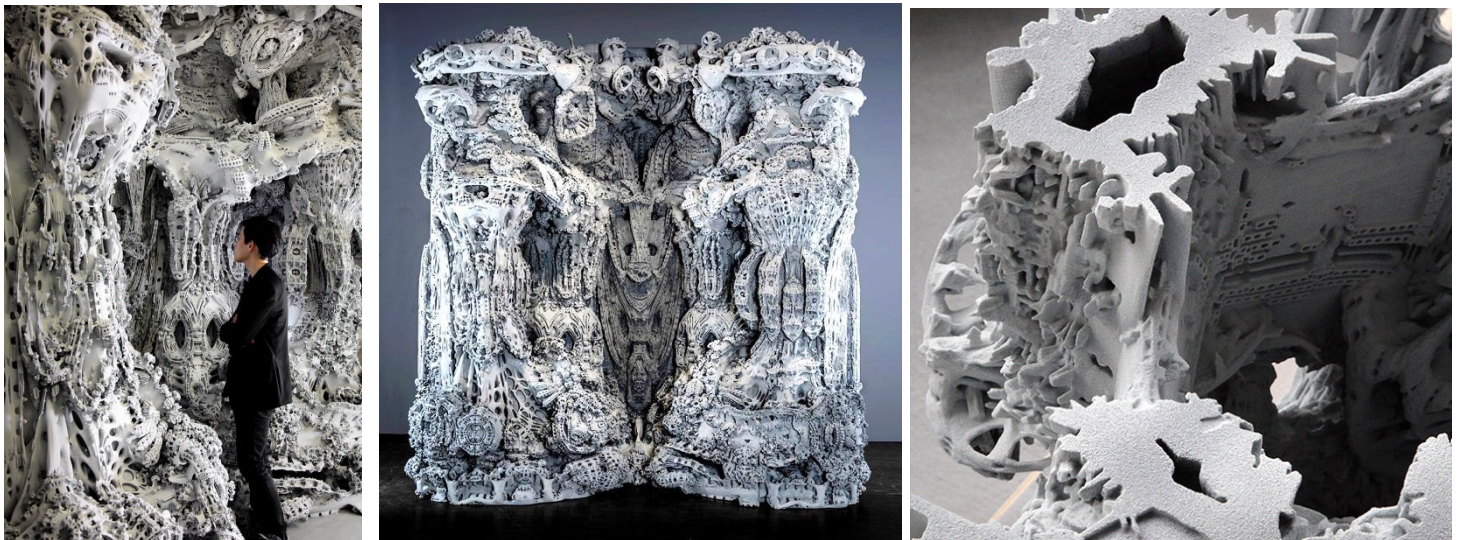
Ao observar as áreas de atuação do departamento de Arquitetura da ETH Zurich, percebe-se que a área de interesse denominada de ITA (instituto de tecnologia em Arquitetura) opera dentro de uma realidade ainda considerada um sonho distante em muitas universidades do Brasil e do mundo. Equipada com diversos equipamentos de fabricação digital, como braços robóticos, impressoras 3D para polímeros, metal e partículas, cortadoras CNC, dentre outros, esta instituição encontra-se imersa em uma cultura guiada pela busca por inovação e melhoria nos processos. O ITA da ETH Zurich desponta como um importante centro de referência na área de fabricação digital em arquitetura e construção.

Dentre as disciplinas oferecidas pelo ITA, a *Digital Building Technologies* (DBT) é uma das que mais utiliza a manufatura aditiva para uso com concreto. Os projetos realizados pela DBT possuem um forte apelo formal e tecnológico, criando condições que justificam o uso da manufatura aditiva como uma ferramenta de vantagem competitiva na criação de formas inviáveis, ou impossíveis de serem feitas sem a combinação entre a computação gráfica e a fabricação digital. Em 2016 projetos como o *Incidental Space* e *Digital Grotesque*, ganharam visibilidade da

mídia ao materializar em grande escala formas complexas geradas por modelagem algorítmica, impressas com Binder Jetting.



Figs. 201 a 203: Incidental space. Fonte: <http://dbt.arch.ethz.ch/dbt-at-venice-biennale/>



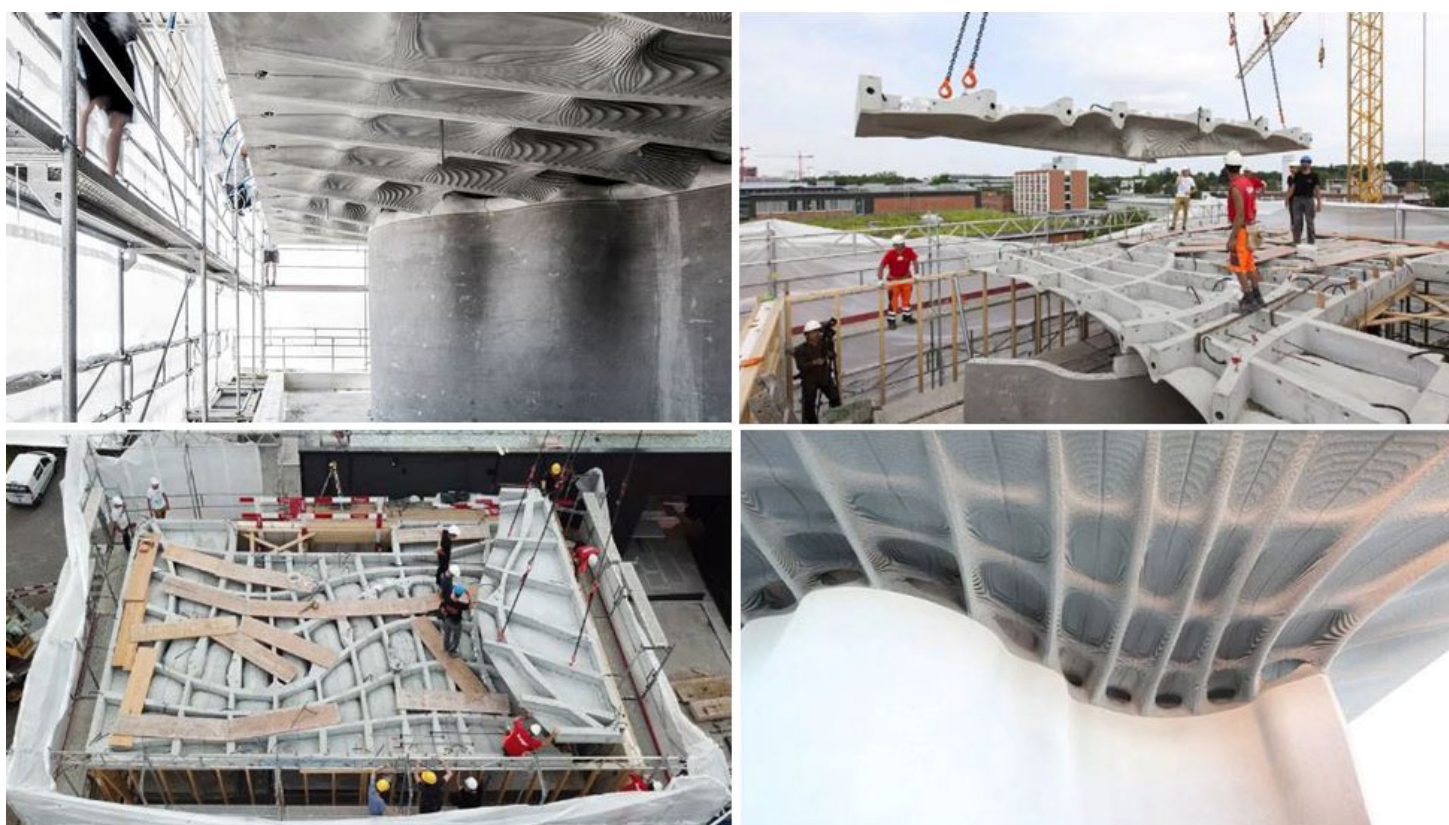
Figs. 204 a 206: Digital Grotto. <https://www.designboom.com/architecture/digital-grotto-2-3d-printed-michael-hansmeyer-benjamin-dillenburger-07-14-2017/>

As pesquisas envolvendo manufatura aditiva e concreto, aplicadas para a construção civil desenvolvidas pela DBT seguiram uma linha diferente da abordada por outros centros de pesquisa que trabalhavam com construção direta por deposição de concreto em estado fresco. Tirando partido da expertise em modelagem de formas complexas e manufatura aditiva por ativação seletiva de partículas de areia com agente aglutinante (Binder Jetting), foram testadas as possibilidades com lajes. Segundo Rufay, a tecnologia *Binder Jetting*, oferece uma excelente liberdade formal para a produção de elementos pré-fabricados, porém, sua baixa resistência estrutural torna essa técnica inapropriada para uso final.

Combinando a *Binder Jetting*, em areia com elementos de alta capacidade estrutural, como o concreto, os pesquisadores conseguiram superar esse problema (Rufay.N. et al. 2017).

### - SMART SLAB

Em 2018, após pesquisas com painéis tipo laje feitos com impressão 3D e otimização topológica, o time de pesquisadores liderados pelo professor da DBT Benjamin Dillenburger aplicou os conceitos em escala real. A *Smart Slab*, surgiu como parte do projeto colaborativo intitulado DFAB HOUSE. Os 11 elementos pré-fabricados da *Smart Slab*, somam 78m<sup>2</sup> quando montados, conseguindo reduzir em 70% do peso que seria utilizado em uma laje de concreto convencional



Figs. 207 a 210: Smart Slab. Fonte: <http://dbt.arch.ethz.ch/project/smart-slab/>

Embora não se trate de uma estrutura de concreto diretamente impresso, o uso intensivo de fabricação digital com impressão 3D e corte à laser permitiu a fabricação de uma laje única, com alta complexidade formal e precisão absoluta. Esta técnica aliada ao concreto protendido convencional mostrou que a integração

das diversas técnicas, digitais e convencionais, pode ser um dos caminhos mais curtos para introduzir o concreto “digital” nas obras de maneira imediata com segurança e respeito às normas estabelecidas.

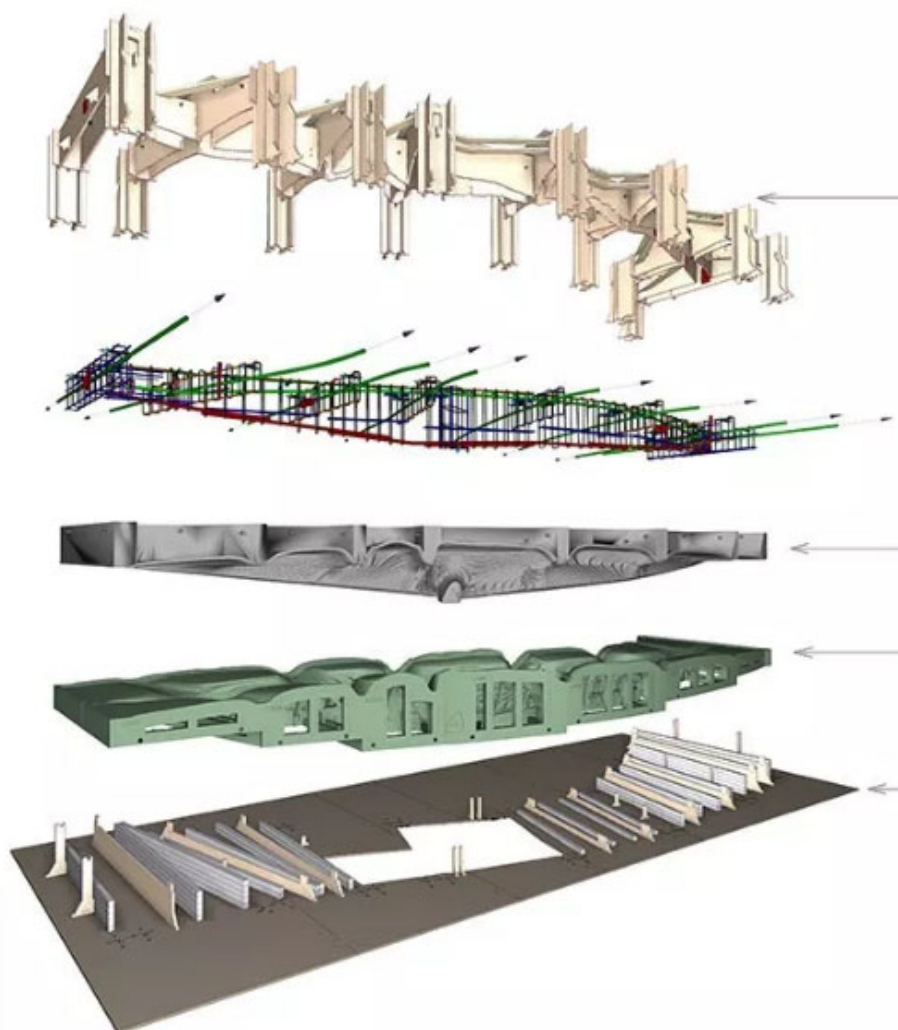


Fig. 211: esquema de montagem da smart slab. Fonte: <http://dbt.arch.ethz.ch/project/smart-slab/>

### 3.7.4 Apis Cor

Os primeiros passos da Apis Cor, uma startup Russa, foram dados no ano de 2015 pelo jovem engenheiro mecânico e empreendedor de 25 anos de idade, Nikita Cheniuntai. Apesar de jovem, ele já havia desenvolvido máquinas de fabricação de fibras de materiais



compostos e criou a Apis Cor enquanto trabalhava no projeto de máquinas para corte CNC por fresa e plasma. Além da Apis Cor, no ramo da construção, ele também empreendeu no ramo de alimentos com startup de criação de startup para criação de sucos por um robô (em andamento) e outra para criação de algodão doce controlado por computador (vendida).



Fig. 212. Fonte: linked in: perfil Nikita Cheniuntai

Cheniuntai percebeu a oportunidade oferecida pela construção civil e listou os pontos que ele considerava críticos nas tecnologias 3DCP disponíveis. Segundo ele, o modelo utilizado pelas tecnologias existentes, baseado em sistema cartesiano com pórtico sobre trilhos, oferecia uma solução de alta precisão, necessitando para isso de uma base absolutamente plana. Esse sistema se justifica em ambiente industrial, perde em produtividade ao necessitar de transporte e mão de obra para montagem.

Já a opção por montar a máquina diretamente sobre o terreno, requer várias horas de mão de obra especializada na montagem, calibração e desmontagem do equipamento. Com base nessas questões, Cheniuntai criou um equipamento composto por um poste central baseado em guindaste com envergadura de 8,5m e montagem estimada em cerca de 1 hora, capaz de cobrir uma área de 132m<sup>2</sup> por vez. Isso significa que utilizando esse princípio, basta relocar o equipamento, que consegue passar por uma porta, que a área útil pode ser ampliada indefinidamente.



Fig. 213. Fonte: <https://www.3dnatives.com/en/apis-cor-3d-printed-house-060320184/>

Em fevereiro de 2017, a Apiscor fabricou uma casa modelo na Rússia para validar sua tecnologia e buscar investimento e parcerias. O resultado foi amplamente divulgado na mídia e permitiu que a empresa criasse uma base nos Estados Unidos. Como resultado empresa foi encubada pela Autodesk e mais recentemente recebeu o apoio da multinacional Gerdau. O modelo de negócios da Apis Cor pretende operar oferecendo serviços e alugando tecnologia. Até o momento a empresa está em fase de aprimoramento para que esta meta seja possível.

### 3.7.5 Icon

A startup baseada no Texas – Estados Unidos surgiu com a parceria do biólogo e empresário de tecnologias sustentáveis, Jason Ballard e Alex Le Roux, engenheiro mecânico por formação e do investidor Evan Loomis. O que diferencia a Icon de outras startups com ideias semelhantes é que a ela lançou proposta para angariar 600 mil dólares e contando com uma rede de parcerias e investimentos por financiamento coletivo, conseguiu levantar 9 milhões de dólares para uma campanha de caridade para El Salvador. Além disso, eles criaram um protótipo de uma casa que está servindo como escritório para validação. As paredes da pequena casa modelo localizada em Austin, no Texas foram feitas em 24 horas.



Figs. 214 e 215.: <https://www.3dprintingmedia.network/icon-9m-3d-printed-housing/>

A proposta da empresa é que sua tecnologia possa servir para atendimento em comunidades em países pobres entregando casas que custam aproximadamente U\$ 4.000,00. Segundo Ballard, os planos da Icon se restringem à construção de casas dignas para famílias pobres utilizando a impressão 3D diretamente no local, de forma rápida, econômica e sustentável. O aporte de 9 milhões de dólares deverá facilitar os planos da empresa de construir casas em El Salvador, bem como nos Estados Unidos.

### **3.7.6 XtreeE,**

A empresa francesa Xtree surgiu em 2015 reunindo colegas de pesquisa de cursos arquitetura, ENSA Paris e engenharia. A proposta da startup utiliza um braço robótico de 6 eixos para mitigar as limitações da impressão 3D em concreto 2.5D, desenvolvida pela Contour Crafting, permitindo formas mais orgânicas e tridimensionais sem a necessidade do uso de suportes. A equipe conta com o suporte de um corpo técnico formado por professores e pesquisadores de universidades francesas em diversas áreas e desenvolveu um sistema de software, hardware e materiais próprio. O resultado desse trabalho é percebido pela sofisticação dos métodos utilizados e o também cuidado com aspectos como o design, e a qualidade da construção das peças.

Utilizando camadas finas, geralmente com cerca de 1.2cm de espessura, a Xtree foi uma das pioneiras, juntamente com a ETH Zurich, no uso da técnica de fôrma definitiva. A criação de formas vazias por dentro funcionando como fôrmas definitivas para uso com concreto de alta resistência, permite que a fabricação digital utilizando concreto contemple as normas de construção. Denominado de UHPC

(ultra high performance concrete), o concreto especial desenvolvido pelo grupo da Xtree permitiu que peças complexas como o pilar em formato de galho de árvore fosse utilizado como elemento estrutural no espaço de recreação de uma pré-escola.



Figs. 216 e 217. Fonte: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/XtreeE\\_3D\\_concrete\\_printing](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/XtreeE_3D_concrete_printing)

Operando em ambiente industrial controlado, a XtreeE utiliza os 6 eixos do braço robótico para conseguir camadas com uma continuidade tangencial (GOSSELIN et al. 2016).



Figs. 218 e 219. Fonte: [https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/XtreeE\\_3D\\_concrete\\_printing](https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/XtreeE_3D_concrete_printing)

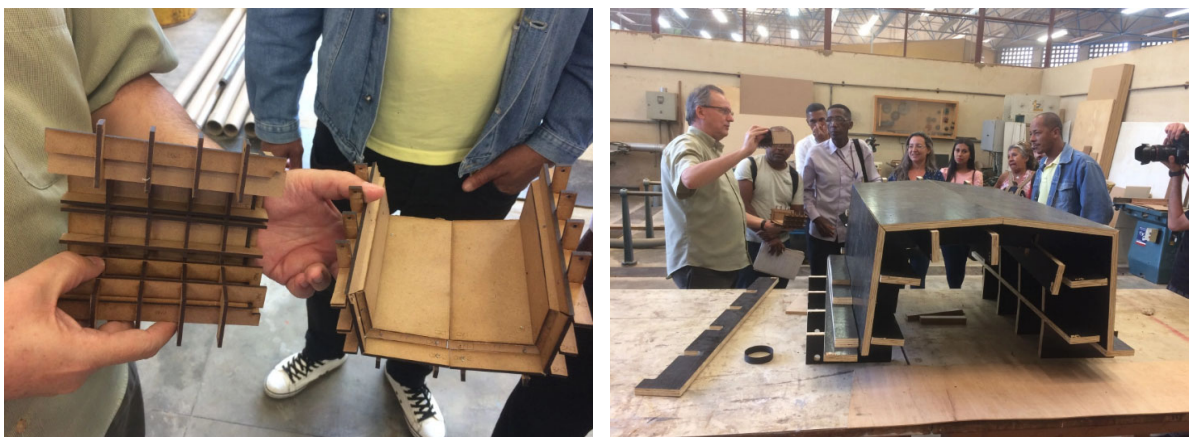
Do caráter interdisciplinar da equipe da Xtree e a versatilidade da sua ferramenta construtiva resulta em diversos projetos para as áreas de arquitetura, engenharia e design, como pode ser visto nas fotos abaixo:



Figs. 220 a 222. Fonte: <https://www.xtreee.eu>

### 3.7.7 – Iniciativas de 3DCP no Brasil

Com poucas iniciativas na área de impressão 3D em concreto no Brasil, as pesquisas que envolvem automação da construção e fabricação digital utilizam, em sua maioria, técnicas de manufatura subtrativa e formativa. Pesquisas relevantes envolvendo concreto para construção assistida por meios de fabricação digital vêm sendo desenvolvidas por grupos de pesquisa como o DIGI FAB/FAUUSP, liderado pelo professor Paulo Fonseca de Campos, em São Paulo. Outro espaço que tem dedicado esforços na construção por meios digitais, com alguns resultados é o Laboratório de modelos 3D e fabricação digital, LAMO, na FAU UFRJ, com pesquisas acerca de pavilhões temporários e estudos formais por meio de algoritmos.



Figs. 223 a 224. Fonte: <https://zlvortice.wordpress.com/2017/10/01/testes-no-fablab-sp-fauusp/#jp-carousel-2103>



Figs. 225 a 226. Fonte: <http://www.lamo.fau.ufrj.br>

Entre os anos de 2016 e 2017 dois estudantes de engenharia da Universidade Potiguar, no Rio Grande do Norte, resolveram criar uma máquina cartesiana de grande formato para imprimir peças em concreto. O time formado pelo professor Dr. André Felipe Oliveira, com larga experiência em engenharia da computação e automação industrial e os estudantes os Iago Felipe e Allynson Aarão conseguiram, após muito trabalho, finalizar a montagem do equipamento com área de impressão de 7,6m x 12m x 3m (LxPxA).

Iago ficou responsável pela parte estrutural da máquina e do sistema de bombeamento. Allynson trabalhou no laboratório de materiais para desenvolver a mistura que atendesse aos requisitos da tecnologia. Ao contrário de algumas startups que iniciaram a busca por investimento antes da criação do produto, o grupo trabalhou até conseguir resultados que falassem por si.



Figs. 227 a 229 Fonte: <https://www.instagram.com/3dhomeconstruction/>

Após alguns meses, de testes e muito trabalho, o grupo conseguiu fabricar uma das primeiras impressoras 3D de grande formato para impressão de concreto do Brasil. De forma discreta, mas contínua, vários testes foram feitos (e continuam sendo). O fato é que eles conseguiram criar estruturas grandes e estão muito perto de conseguir paredes mais altas. A iniciativa agora está em fase de abertura de investimentos e se chama 3D Home Construction. Abaixo, segue uma breve entrevista com o grupo:

- **Autor:** Vocês começaram de forma discreta em termos de marketing. Eu, particularmente, conheci o trabalho de vocês através de um amigo em um evento sobre impressão 3D. Tenho pesquisado sobre impressão 3D em concreto e sei dos desafios quando se amplia a escala. Ainda mais utilizando um material com características difíceis de controlar como o concreto. Hoje, percebo que vocês conseguiram chegar a um nível que permite que passos mais largos sejam dados. Como se divide a equipe e quais as principais dificuldades encontradas até o estágio no qual vocês estão hoje?

- **3D home Construction:** Apesar da *3D home Construction* ser formada por 3 sócios, o projeto de impressão 3D que estamos fomentando é muito maior. Estamos com uma equipe boa da UnP e UFRN para fazer o desenvolvimento tecnológico do material a ser utilizado, focando no barateamento dos materiais. O restante do desenvolvimento ainda é concentrado na equipe principal (Allynson, André, Iago). Com relação ao processo de impressão, a principal dificuldade é que pequenas modificações tanto a nível de software quanto a nível de hardware podem fazer muita diferença no desempenho final da impressão. E quanto ao desenvolvimento tecnológico como um todo, a maior dificuldade é conseguir força para fazer os empresários, donos de capital privado, acreditarem na ideia.

- **Autor:** Imprimir em ambiente controlado e transportar as peças, ou levar o ambiente controlado para o canteiro de obras? Qual dessas abordagens vocês pretendem utilizar?

- **3D home Construction:** Cada caso é um caso. O que pretendemos ao final de nossa primeira etapa é desenvolver a impressão 3D. Na sequência, temos não só essas duas possibilidades. Se vamos fazer pré-moldados, por exemplo, podemos fazê-lo no local da construção. Podemos, também, imprimir fôrmas usando o nosso material para, na construção, usá-las, minimizando o tempo de impressão e o custo com as formas tradicionais. Além disso, podemos até reaproveitar as fôrmas fabricadas.

-**Autor:** Vocês estão prestes a imprimir as paredes de uma casa popular. Já é possível vislumbrar alguma vantagem competitiva, como redução de custo? Já é possível estimar o custo para imprimir, sem considerar complementos, nem acabamentos?

- **3D home Construction:** Apesar de conseguirmos estimar que haverá uma grande redução do custo com mão de obra, ainda não conseguimos estimar qual seria o menor preço possível de ser alcançado. Atualmente, é possível imprimir uma parede ao custo de 22R\$/m<sup>2</sup>, o que provavelmente

não seja o menor custo possível. Quanto a questão do acabamento, isso pode ser realizado pela própria máquina, em uma versão mais completa, significando que o preço citado já incluiria o nivelamento da parede, por exemplo.

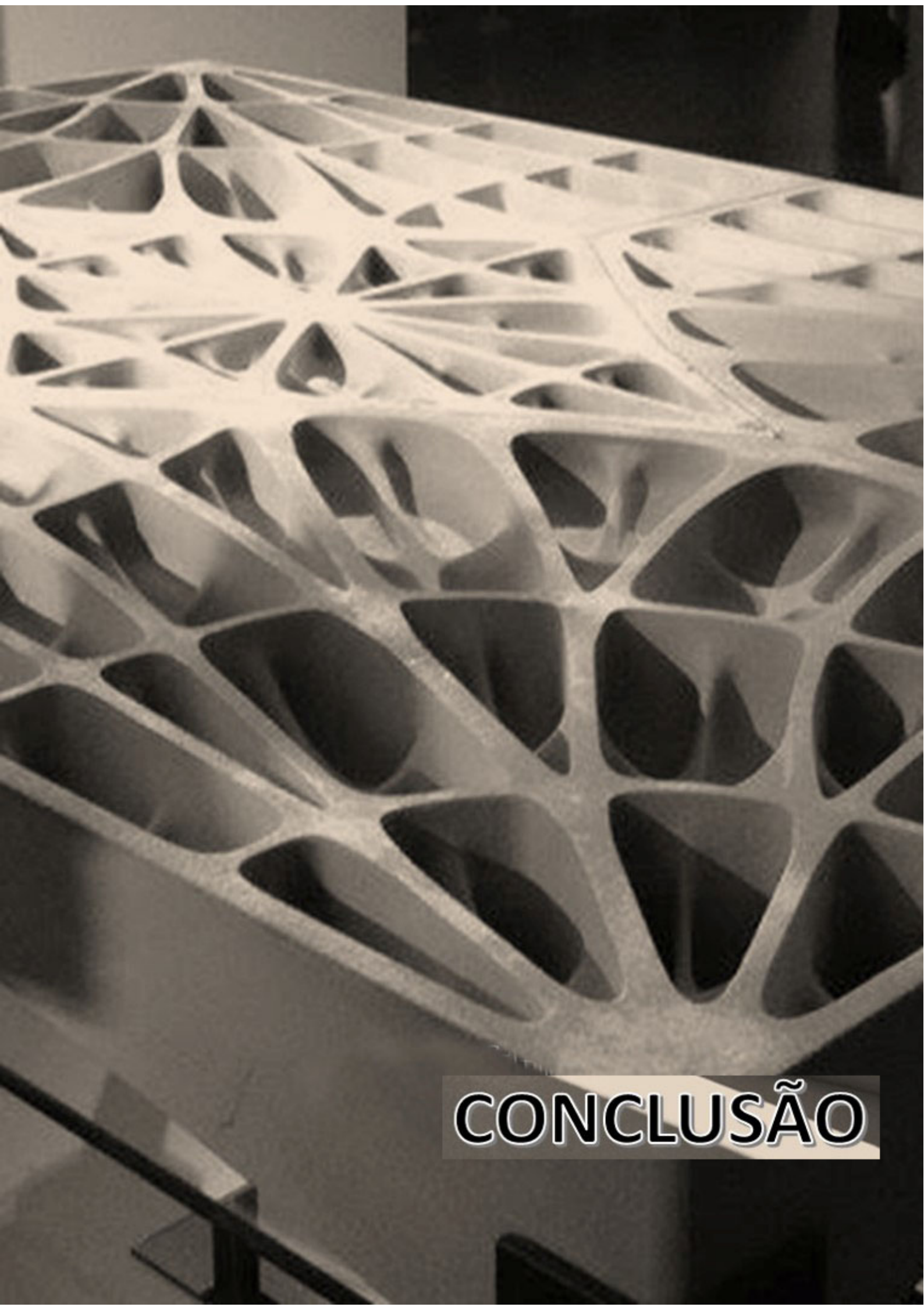
- **Autor:** Algumas empresas como a Wasp, utilizam a manufatura aditiva para imprimir casas usando um material sem cimento, composto por argila. É uma alternativa tecnológica às tradicionais casas de taipa. Vocês chegaram à cogitar essa linha de pesquisa?

- **3D home Construction:** Nosso nível de desenvolvimento tecnológico atual nos permite imprimir qualquer material que seja fluido o suficiente e que não tenha partículas com diâmetro alto. A utilização de diferentes compostos, nesse caso, seria uma questão de disponibilidade dos recursos, custo e impacto socio-ambiental. Em nosso planejamento, consideramos o desenvolvimento de vários materiais que nos permitam reaproveitar resíduos, utilizar compostos que minimizem a emissão de CO2 e, ao mesmo tempo, baratear a construção em relação às tecnologias atuais. Sabemos que isso é um grande desafio, mas precisamos encará-los para que tenhamos um desenvolvimento sustentável.

- **Autor:** No decorrer desta pesquisa, foram descritos os tipos de sistema de extrusão para LDM (liquid deposition modeling) e em quais grupos elas estão sendo empregadas. Sabemos das inúmeras possibilidades de arranjo e que dependendo da viscosidade do material uma alternativa pode não ser tão eficiente quanto comparada à outra. Poderia descrever, mesmo que com algumas restrições de informação, o funcionamento do sistema que vocês criaram? Há um controle integrado entre o movimento do extrusor e o fluxo do bombeamento do material? Qual o tipo de solução para bombeamento e extrusão foi adotado? Foi possível aproveitar os fatiadores utilizados na impressão 3D FDM? Foi necessário criar algum software para controle?

- **3D home Construction:** A maioria das impressoras são baseadas nos mesmos princípios. Temos um manipulador cartesiano capaz de posicionar o composto cimentício em um espaço tridimensional. Esse manipulador recebe o composto a partir de uma bomba projetora, cuja tecnologia não podemos mencionar. É óbvio mencionar que para que a impressão tenha boa qualidade os processos devem estar sincronizados, ou seja, desde a preparação do material (traço para o composto cimentício), passando pela bomba projetora até o posicionamento do material conforme o desenho 3d, todas as etapas devem ser bem controladas e sincronizadas. Quanto a questão dos softwares e firmware, os disponíveis no mercado não se adequavam exatamente às nossas necessidades. Portanto, apesar de parte das soluções serem obtidas de outras soluções, fizemos várias modificações necessárias para refinar o nosso produto. Por último, criamos softwares de controle. Porém, ainda não estamos nem perto do que planejamos, tanto no controle quanto na solução em geral. Pretendemos que nossa tecnologia seja capaz de imprimir todas as paredes em 6h, com qualidade e precisão e baixo custo. Pelo menos essa é a meta para a impressão in situ.





**CONCLUSÃO**

## CONCLUSÃO

Após apresentar as categorias de 3DCP por extrusão de material e sobre camada de partículas atualmente utilizadas na manufatura aditiva em concreto, foi elaborada uma análise comparativa entre os processos e seus respectivos desenvolvedores. Apesar de cerca de 30 grupos divididos em empresas e instituições de pesquisa que utilizam a tecnologia para imprimir em 3D em concreto, (R.A Buswell et al. 2018) a tabela seleciona apenas os mais relevantes, considerando o caráter de vanguarda, inovação e resultados realmente executados. Todavia, constata-se que existem diferentes objetivos e formas de aplicação dessas tecnologias, sendo algumas pesquisas e aplicações ainda embrionárias ou como prova de conceito, outras com patentes e aplicação comercial, com edifícios e grandes peças efetivamente construídos.

Construção da edificação inteira <i>in situ</i> , com impressora de concreto na obra	Impressão 3D de partes em ambiente controlado e montagem no terreno
CONTOUR CRAFTING	LOUGHBOROUGH,
ANDREY RUDENKO TOTAL KUSTOM	WIN SUN
APISCOR	D- SHAPE
ICON	TU BOWL
	XTREEE
	ETH-ZURICH

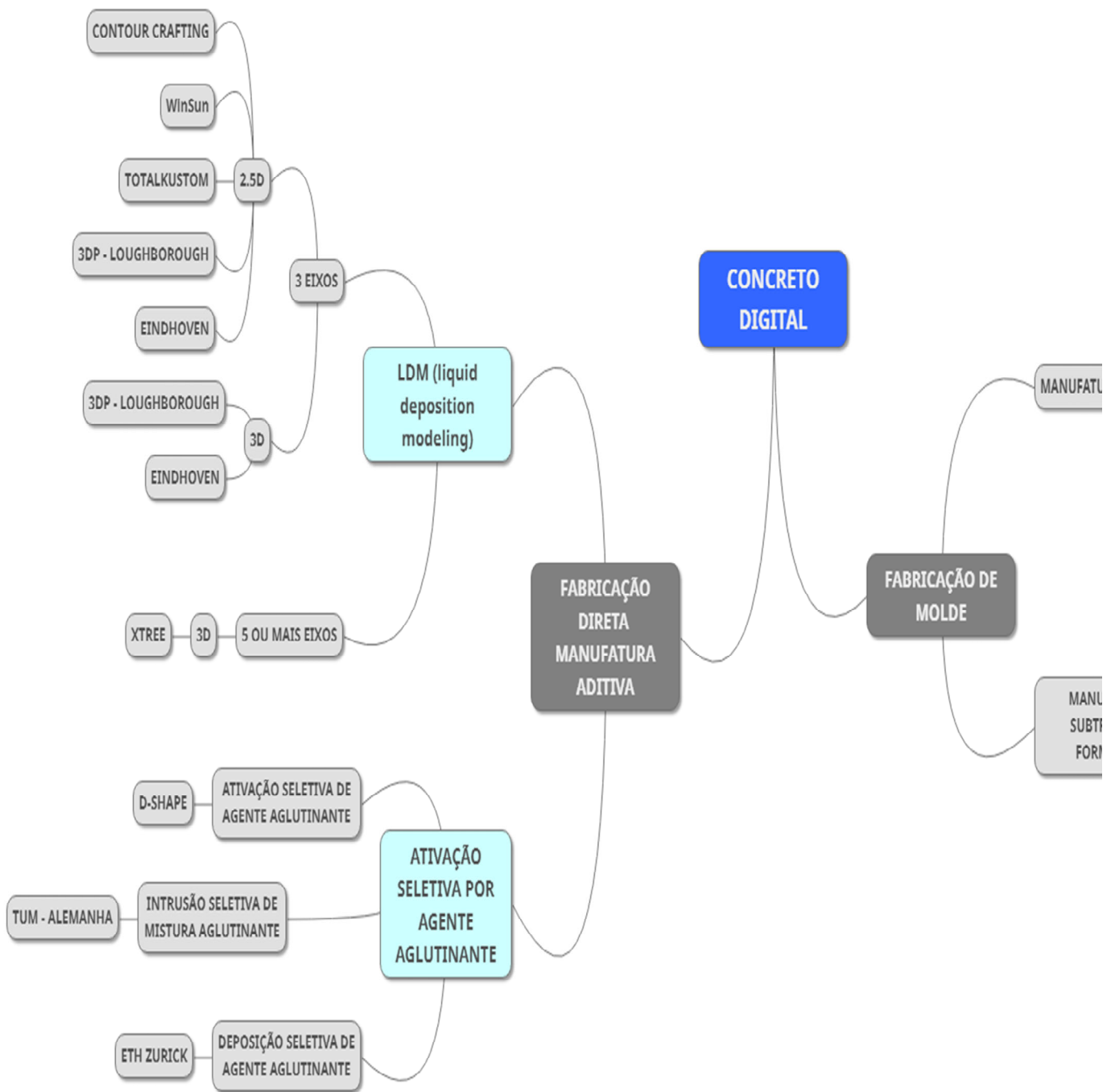
Uma das grandes vantagens de se focar a impressão de peças é sua factibilidade quase que imediata. A já amadurecida indústria da pré-fabricação em concreto poderia absorver de imediato os meios de produção desenvolvidos para a construção em concreto assistida por ferramentas de fabricação digital como impressão 3D de peças, moldes definitivos e também de moldes CNC. Assim, a inovação aí ocorrida, apesar de disruptiva em muitos aspectos, não necessitaria revolucionar completamente a cadeia produtiva da construção. Ou seja, não representaria uma completa quebra de paradigma, mas uma alternativa viável. Por outro lado, as desvantagens continuam sendo as mesmas da pré-fabricação em concreto: custo de transporte, armazenamento e montagem que no caso de grandes peças eleva o risco de acidentes de trabalho e aumenta a complexidade da

operação de fabricação e montagem. Além dos aspectos de printabilidade, detalhados no cap.3, a diversidade de métodos encontrada nas iniciativas que empregam a 3DCP abre oportunidades para novos estudos. Nesse sentido, foi elaborado um esquema (fig. 230), associando as principais possibilidades relevantes para o objeto de pesquisa até o momento, compreendidas pelo grupo de ferramentas tecnológicas inerentes ao concreto “digital”. Segundo R.A. Buswell, “...o sucesso comercial da 3DCP depende da habilidade dos arquitetos e engenheiros para criar componentes certificáveis de qualidade, cujo parâmetro de medida reside na precisão da manufatura, na performance do material e no caráter estético.” (BUSWELL, 2018).

Do ponto de vista tecnológico, após identificação das iniciativas acerca da tecnologia 3DCP, foi possível classificar e comparar os métodos utilizados. É certo que ao incluir técnicas de fabricação digital, extrapolando o uso do concreto para além da manufatura aditiva, temos uma ampla variedade de técnicas possíveis e relevantes de acordo com a especificidade de cada situação. Ao analisar de forma comparativa as categorias e técnicas que envolvem a 3DCP, nos deparamos com uma quantidade relevante de possibilidades.

Do ponto de vista legal, o uso de moldes fabricados digitalmente terão um papel importante na validação normativa do concreto digital. Esta premissa é especialmente válida na fabricação de elementos estruturais como lajes e pilares. A ampliação do uso do concreto digital na construção civil certamente dependerá da soma de técnicas de fabricação digital, não se restringindo ao uso da manufatura aditiva em concreto. Isso permitirá a introdução da impressão 3D em concreto nos processos de pré-fabricação sem que para isso seja necessário uma mudança significativa nos processos.

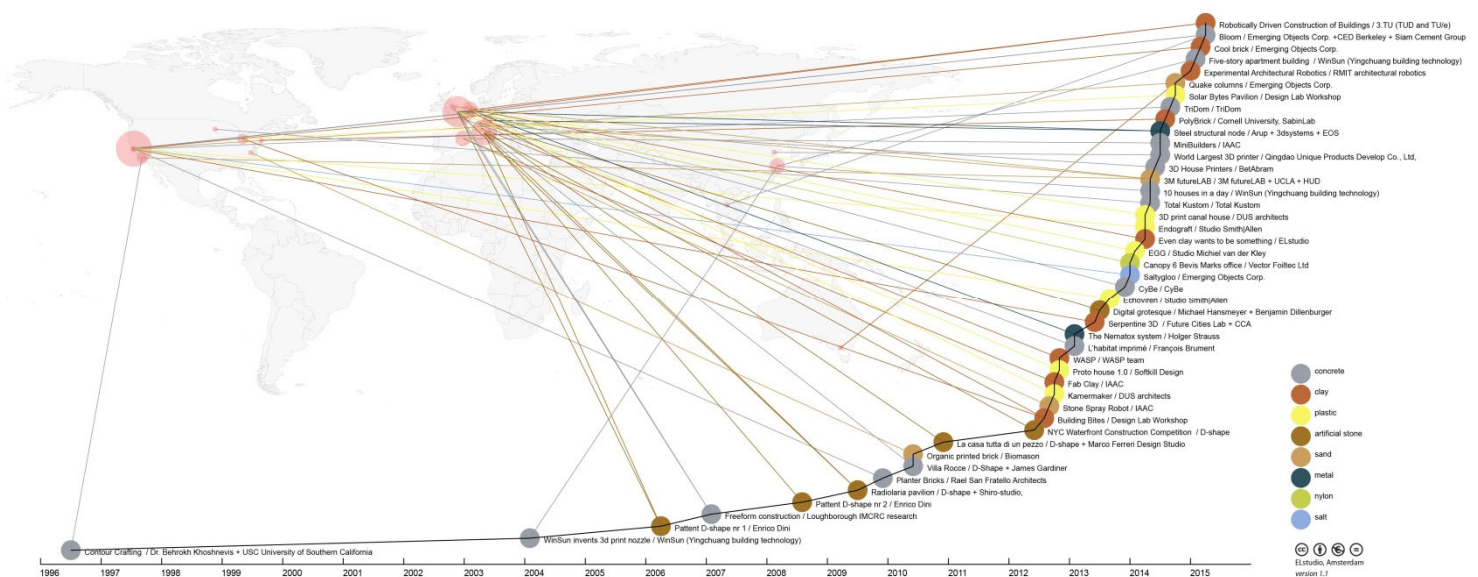
Do ponto de vista técnico, a impressão 3D em concreto conquistou avanços importantes desde seu surgimento. A partir de estudos conduzidos por importantes centros de pesquisa ao redor do mundo, foi possível identificar as principais características que influenciam no resultado final. Questões relacionadas ao design para manufatura, maquinário, ambiente de fabricação e composição do material, devem ser tratadas de forma interdependente e podem interferir no sucesso do objeto fabricado em concreto.



Figs. 227 a 229: esquema com as possibilidades e iniciativas. Fonte: o autor

Conforme visto, estamos diante de uma tecnologia considerada promissora, com mais de duas décadas de avanços em pesquisa e desenvolvimento e com um evidente potencial para introduzir novas rotinas na construção civil tradicional. A *SmarTech Publishing Report*, empresa especializada em pesquisa e estatística, sugere um crescimento exponencial do uso das tecnologias digitais em concreto para a próxima década. Vale ressaltar que o aproveitamento pleno dessas ferramentas digitais não depende apenas da tecnologia em si, mas de questões culturais, normativas, econômicas e do próprio amadurecimento tecnológico, que necessitará de alguns anos para ser assimilado e gradativamente validado.

O impacto causado pelo projeto Contour Crafting, medido pelo gráfico (fig. 231), que ilustra quantitativamente o crescimento de iniciativas, não necessariamente em concreto, é um importante dado para medir o interesse em pesquisa e desenvolvimento para novas tecnologias construtivas. Percebe-se um crescimento considerável a partir de 2010, impulsionado por outras iniciativas, como a 3DP (LoughBorough e WinSun), mas fruto da Contour Crafting.



Figs. 231: evolução da impressão 3D em escala ampliada após o projeto Contour Crafting. Fonte:

<http://www.3dprintingarchitecture.net/?p=601>;

O distanciamento entre as indústrias de manufatura e da construção civil tem diminuído na medida em que várias frentes tecnológicas, e não apenas a 3DCP sozinha, avançam. As soluções desenvolvidas para impressão 3D em concreto se mostram adaptáveis tanto no ambiente industrial, quanto no próprio canteiro de

obras. Como vantagem tecnológica da impressão 3D em concreto, espera-se uma adaptação que a insira nos meios de produção existentes sem que haja uma mudança radical nos processos. Nesse sentido, é possível indicar um aumento de mão de obra mais qualificada e melhoria de condições para a força de trabalho com pouca qualificação, que continuará sendo necessária.

As projeções sobre o mercado da manufatura aditiva divulgadas em anuários conceituados como o Wohlers Report são importantes ferramentas para a tomada de decisão por investidores. O Wohlers divulga resultados desde 1995, indicando um crescimento contínuo para o mercado de manufatura aditiva. Segundo a edição de 2018 do Wohlers Report, houve um crescimento de 21% no mercado de produtos e serviços relacionados à manufatura aditiva no mundo. O valor divulgado de pouco mais de 7 bilhões de dólares não inclui investimentos internos feitos por grandes multinacionais como a Ford, AirBus, Adidas, Toyota, dentre outras.

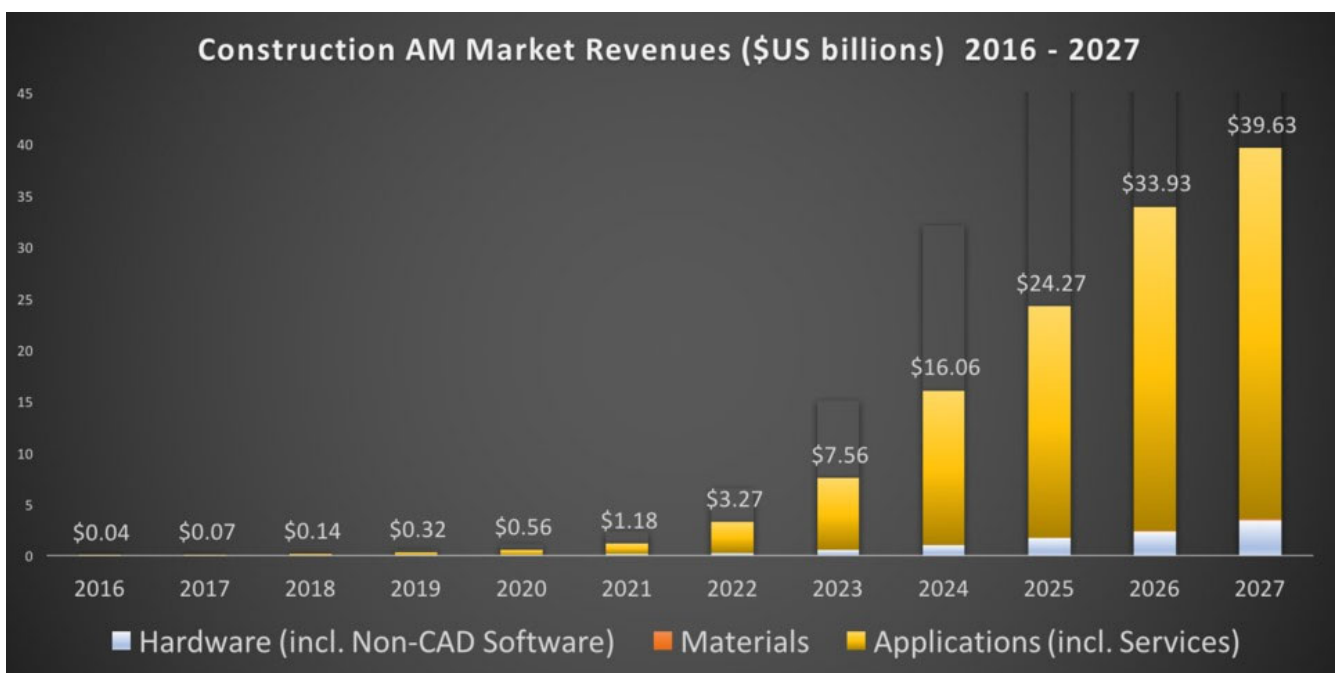


Fig. 232: Fonte: <https://www.forconstructionpros.com/construction-technology/news/20989215/report-construction-industry-to-massively-adopt-3d-printing-technologies-generating-40-billion-in-revenues-by-2027>

Outra empresa especializada em pesquisa de mercado, a SmarTech Publishing Report, projeta que a indústria da construção deverá adotar massivamente tecnologias de fabricação digital, incluindo a manufatura aditiva, com investimentos na ordem de 40 bilhões de dólares até 2027. Parte dos dados levantados pela instituição de estatística se deve ao desenvolvimento das pesquisas em

universidades, bem como o potencial de crescimento das startups. Percebe-se pelo gráfico (fig. 232), que o momento atual ainda é de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, normativo e cultural. Diante dessa previsão, espera-se que a partir de 2022 a indústria da construção civil estará preparada para uma transformação mais expressiva em seus processos.

Do ponto de vista projetual, estamos diante da expectativa de um longo período de assimilação das mídias digitais nos processos de construção, o *profissional do futuro*<sup>1</sup> deverá saber lidar com as realidades do meio digital tecnológico e do tradicional, baseado no experimentalismo e no artesanal. A tendência do uso cada vez maior de simulações computacionais para o desenho de elementos, através de otimização topológica e modelagem generativa é um campo ainda pouco explorado que deve crescer junto com o estabelecimento das tecnologias para fabricação digital em concreto. O impacto na concepção da arquitetura não vem apenas da impressão 3D em concreto, mas do conjunto de ferramentas digitais onde a 3DCP se inclui, juntamente com vasto repertório de softwares que incluem o BIM, a modelagem algorítmica, as simulações de elementos finitos, otimização topológica e as inúmeras possibilidades de interação das ferramentas de fabricação digital.

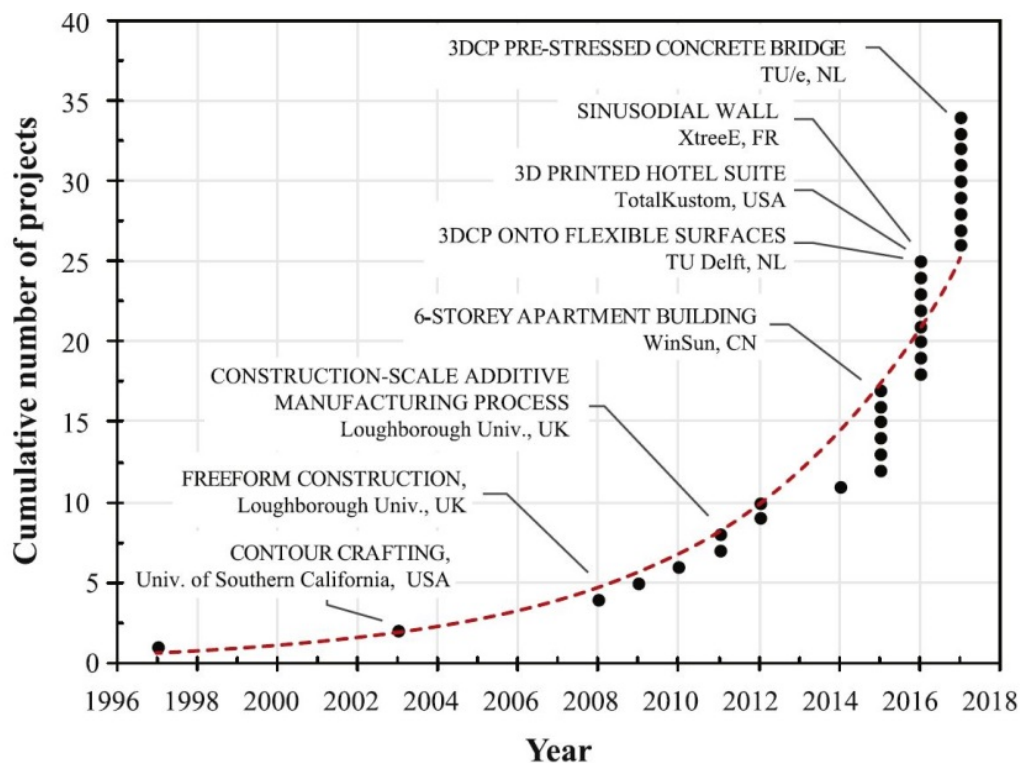


Fig. 233 Fonte: (Buswell, 2018)

Segundo levantamento sobre o estágio atual da tecnologia de impressão 3D em concreto foi estabelecido um gráfico com as principais iniciativas em pesquisa e desenvolvimento (universidades e empresas), situando-as no tempo de acordo com a quantidade de projetos desenvolvidos em cada ano (BUSWELL, 2018). Percebe-se que a maior parte dos projetos está dentro ou teve origem em universidades. Isso reforça a importância dos programas de formação, pesquisa e desenvolvimento para o estabelecimento das novas tecnologias no âmbito industrial.

Certamente o impacto mais evidente a ser percebido pelos arquitetos envolvidos com um ou mais meios de fabricação digital será o maior envolvimento com a materialização, fazendo com que sua presença no canteiro de obra ou na fábrica seja maior. Outro aspecto vislumbrado nesse ensejo é o formal. A fabricação digital em concreto aponta para uma maior integração entre a liberdade de formas dentro de um custo possível. Na academia e no mercado de trabalho, o atual distanciamento e segregação de funções tende a ser minimizado e espera-se uma interação e colaboração maior entre as disciplinas, como tem acontecido nas iniciativas para concreto digital na Holanda, Suíça, Estados Unidos, França e Inglaterra. Isso deve ser visto como algo benéfico e não impedirá as especializações e responsabilidades individuais.

Ao considerar a expertise de alguns centros brasileiros de pesquisa aplicada ao design generativo por algoritmos e simulações. Pretende-se que esta pesquisa seja continuada em nível de doutorado com foco no desenvolvimento aplicado das possibilidades da impressão 3D para arquitetura e engenharia. Não restrita apenas ao material concreto, mas com a colaboração de outras pesquisas envolvendo concretos especiais, pastas e polímeros para uso em impressão 3D. Campo ainda pouco explorado no contexto mundial e relevante para o desenvolvimento da manufatura aditiva em concreto no Brasil.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALAGUER, C.; ABDERRAHIM, M.(2008). *Trends in Robotics and Automation in Construction*, In: BALAGUER, C.; ABDERRAHIM, M. *Robotics and Automation in Construction*, p.1-22. Europe Union: InTech, 2008.

BOS, F. et al. *Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing*. *Virtual and Physical Prototyping*, v.11, n.3, p.209-225, 2016.

BOOTHROYD, G.,Product Design for Manufacture and Assembly Dewhurst, P., Knight, W. (2002).

BUSWELL R.A., Soar R.C., Gibb A.G.F., Thorpe A. *Freeform Construction: Megascale Rapid Manufacturing for construction*. In: *Automation in Construction* 16,2007, p.224–231.

BUSWELL R.A. et al., 3d printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and concrete research*,v. 112, p. 37-49.

CELANI, G.; PUPO, R. T. *Prototipagem Rápida e Fabricação Digital para Arquitetura e Construção: Definições e Estado da Arte no Brasil*. *Cadernos de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo*, Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, v. 8, n.1, p.31-41, jan. 2008.

CELANI, G, SEDREZ, M (orgs). *Arquitetura contemporânea e automação*. São Paulo: Probooks, 2018.

CORSER, R.. *Fabricating architecture: selected readings in digital design and manufacturing*. 1. ed. New York: Princeton Architectural Press, 2010.

FONSECA DE CAMPOS, P. e LOPES, E. A fabricação digital aplicada à construção industrializada: estado da arte e perspectivas de desenvolvimento. *Concreto & Construções*, jan-mar, pp. 22-29, 2017.

FLORENCIO, E., QUINTELLA, I., FERREIRA, D. *O futuro do processo construtivo? A impressão 3d em concreto e seu impacto na concepção e produção da arquitetura arquitetura...* Buenos Aires: XX SIGRADI Proceedings, 2016, pp.305-309.

FLORENCIO, E. MARQUES, L., CORSO, N. Alves Lima, Thiago & Uchoa, Silvia. *Concreto para uso em impressora 3D e sua utilização na construção de edificações: um estudo prospectivo*. Cadernos de Prospecção. 10. 578. 10.9771/cp.v1, 0i3.23203, 2017.

GARDINER J. *Exploring the emerging design territory of construction 3D printing-project led architectural research*, 2011. thesis for the degree of Doctor of Philosophy School of Architecture and Design Design and Social Context, RMIT University, 2011.

GERSHENFELD, Neil. *Fab: The Coming Revolution on Your Desktop-From Personal Computers to Personal Fabrication*. Cambridge: Basic Books, 2011.

GRAMAZIO, Fabio (Editor); KOHLER, Matthias (Editor). *Made by Robots: Challenging Architecture at a Larger Scale*. John Wiley & Sons, 2014.

HAMZÉ, Farook; et al. *3D Concrete Printing: Machine and mix design*. International Journal of Civil Engineering and Technology, v.6, n.6, p. 14-22, jun. 2015.

HARTY, C. *Implementing innovation in construction: contexts, relative boundedness and actor-network theory*. Construction Management and Economics, v. 26, p. 1029-1041, 2008.

IWAMOTO, L. *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Nova York: Princeton Architectural Press, 2009.

KOLAREVIC, B. *Architecture in the Digital Age – Design and Manufacturing*. New York: Taylor & Francis, 2005.

KHOSHNEVIS, B.; RUSSELL, R.; KWON, H.; BUKKAPATNAM, S.; *Contour Crafting – A Layered Fabrication Technique*. IEEE Robotics and Automation Magazine, v. 8, n. 3, set. 2001. p. 33-42.

KHOSHNEVIS, B et Al. *Automated construction by contour crafting-related robotics and information technologies*. Automation in Construction, Vol. 13, pp.5–19, 2004.

KREIGER, A., et al. *The current State of 3D Printing for Use in Construction*. In: Proceedings of the 2015. Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure Iowa State University. Ames: Iowa State University, 2015. p. 149-157.

KUPFER, D.; TIGRE, P. (2004). *Prospecção Tecnológica*. In: CARUSO, L. A.; TIGRE, P.(Orgs). *Modelo Senai de prospecção: documento metodológico*. Montevideo: CINTERFOR/OIT, 2004. Disponível em: <[http://www.ie.ufrj.br/gic/pdfs/modelo\\_senai\\_de\\_prospeccao\\_cap2.pdf](http://www.ie.ufrj.br/gic/pdfs/modelo_senai_de_prospeccao_cap2.pdf)>. Acesso em: set 2014.

LABONNOTE, N.; RUTHER, P. *Additive manufacturing: An opportunity for functional and sustainable constructions*. In: SILVA, F. et al (ORGs). *Challenges for Technology Innovation: An Agenda for the Future: Proceedings*, 2017.

LABONNOTE, N. et al. *Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities*. *Automation in Construction*, 2016. Disponível em: <<https://www.gartner.com/doc/2669320?ref=unauthreader>>. Acesso em 10/07/2017

LIM, S. et al. *Development of a viable concrete printing process*. In: Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Symposium on automation and robotics in Construction (ISARC2011). Seul, 2011. Pp.: 665-670.

LOWKE, D. et al. *Particle-bed 3D printing in concrete construction – Possibilities and Challenges*, *Cement and concrete research*, 2018

\_\_\_\_\_. *Developments in construction-scale additive manufacturing processes*. *Automation in Construction*. n.21, p. 262-268, 2012.

LU, B. et al. *A Review of 3D Printable Construction Materials and Applications*. In: 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing. *Progress in additive manufacturing*. Singapore: 2016, p. 330-335.

MANTOUX, P. *The industrial Revolution in the Eighteenth Century*. Nova York: Routledge, 2013.

NABONI, R.; PAOLETTI, I.. *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*. Milano: Politecnico di Milano – Springer, 2015.

PANDA, B. et al. *The Disruptive Evolution Of 3D Printing*. In: 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing. Progress in additive manufacturing. Singapore: 2016, p. 152-157.

PEGNA, J. Exploratory investigation of solid freeform construction. *Automation in Construction*, n.5, p. 427-437, 1997.

PAUL, C. et. Al. *Processing and Properties of Construction Materials for 3D Printing*. *Material Science Forum*, v. 861, p. 177-181, 2016.

PRENTICE, S. The five SMART technologies to Watch. Gartner, Connecticut, 21 fev. 2014. Disponível em: <<https://www.gartner.com/doc/2669320?ref=unauthreader>>. Acesso em 10/07/2017

RUFFRAY, N. et al. Complex architectural elements from hpfrc and 3d. *Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete, UHPFRC*, 2017.

#### PRINTED SANDSTONE

SEVENSON, B. 2015. Shanghai-based WinSun 3D Prints 6-Story Apartment Building and an Incredible Home. From <http://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/>.

SPERLING, D. M.; HERRERA, P. C. (Editores). *Homo Faber: Digital Fabrication in Latin America (2015)*.— São Carlos: Instituto de Arquitetura e Urbanismo, 2015. Disponível em: [http://www.fec.unicamp.br/~celani/caadfutures\\_](http://www.fec.unicamp.br/~celani/caadfutures_)

SCHODEK, D. et al. *Digital Design and Manufacturing*. New Jersey: John Wiley and sons, 2005.

SILVA, N. et al., A indústria da construção civil está pronta para a fabricação digital em massa? Uma pesquisa sobre o caso brasileiro. *SIGraDi*, sp 2009.

VOLPATO, Neri; AHRENS, Carlos Henrique (orgs). *Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações*. São Paulo: E, Blucher, 2007.

VOLPATO, N. (org.). *Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D*. São Paulo: Blucher, 2017.

VALKENAERS, H. et al. *Additive Manufacturing for concrete: a 3D print principle*. In: 14<sup>e</sup> euspen International Conference. Non-KU Leuven Association publications. Dubrovnik: euspen. jun. 2014, p. 139-142.

ZIJL, V. et al. Properties of 3D Printable Concrete. In: 2nd International Conference on Progress in Additive Manufacturing. Progress in additive manufacturing. Singapore: 2016, p. 421-426.

ZOCCHI, G. New developments in 3D printing of composites: Photocurable Resins for UV-Assisted process. 2016.