

**FUTURAS TECNOLOGIAS APLICADAS À ARQUITETURA**

**DO DIGITAL PARA O MATERIAL**



Mestrando: Frank Pedrosa Santos

Orientador: Prof. Dr. Gonçalo Canto Moniz

Coorientador: Prof. Dr. Mauro Costa Couceiro

2017/2018 - Departamento de Arquitetura - Universidade de Coimbra



## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Mauro Costa, pela grande paciência e apoio na hora da dissertação desta tese e pela ajuda e disponibilidade na resolução de problemas acadêmicos.

Aos meus pais, pelo amor e carinho que sempre me deram, pelo sacrifício que fizeram para eu poder seguir o meu longo percurso acadêmico e aos bons conselhos perante decisões difíceis.

Ao meu irmão, pelas inúmeras dores de cabeça e bons momentos passados.

A todos os meus familiares, pelos bons momentos e conhecimentos que me transmitiram ao longo dos anos.

À Katya, pelo amor e paciência perante mim, a excelente companhia durante as nossas belíssimas viagens e momentos do dia-a-dia.

Aos meus amigos, pela ajuda, suporte e distrações providenciadas durante a minha vida e meu percurso acadêmico.

A todos os professores do Darq, pelas boas e más lições da vida que me ensinaram.

As senhoras da secretaria, pela boa disposição e paciência para resolverem os meus problemas burocráticos/acadêmicos.

A todos vós, um muito obrigado.



## **Resumo**

**Palavras-chave:** Fabrico Aditivo, Arquitetura, Impressão Tridimensional, Extrusão, Robótica.

Esta tese tem como principal objetivo determinar a potencialidade do uso de métodos de Fabrico Aditivo na Arquitetura.

Num primeiro capítulo, pretende-se fazer uma introdução ao Fabrico Aditivo, às potencialidades e aplicabilidade dessas técnicas em várias áreas, esclarecendo, as suas vantagens. Passando, por seguida, a uma análise de casos de estudo que possam ter relevância para os capítulos seguintes.

O segundo capítulo dedica-se principalmente a desenvolver uma potencial ferramenta de construção edificatória, recorrendo a softwares de análise de elementos finitos, a estudos de formas geométricas e aos ECC (Engineered Cementitious Composites) por forma a reforçar falhas estruturais dos métodos de Fabrico Aditivo.

Num terceiro e final capítulo, faz-se uma reflexão sobre as questões abordadas nos capítulos anteriores e expõe-se a viabilidade destes métodos para a construção do edificado.



## **Abstract**

**Keywords:** Additive Manufacturing, Architecture, Three-dimensional Printing, Extrusion, Robotics.

This thesis has as main objective to determine the potentiality of the use of Additive Manufacturing methods in Architecture.

In the first chapter, I intend to introduce the Additive Manufacturing (AM), the potentialities and applicability of these techniques in several areas, explaining its advantages. Followed by an analysis of case studies that may be relevant to subsequent chapters.

The second chapter is dedicated to the development of a potential tool for building houses, using finite element analysis softwares, geometric studies and ECC to reinforce structural failures that Additive Manufacturing might show.

In a third and final chapter, a reflection is made on the issues addressed in the previous chapters and it is exposed whether these methods may or may not be viable for the construction of buildings.





## Índice

1	Introdução .....	13
1.1	Âmbito da Investigação .....	13
1.2	Metodologia .....	13
1.3	Objetivos .....	13
1.4	Estrutura da Tese .....	15
2	O que é AM? .....	19
3	As Famílias do Fabrico Aditivo.....	21
3.1	Vat Photopolymerization (Fotopolimerização em Cuba).....	21
3.2	Powder Bed Fusion (Sinterização Seletiva Por Laser) .....	21
3.3	Binder Jetting (Jato de Agente Aderente) .....	23
3.4	Material Jetting (Jato de Material).....	23
3.5	Sheet Lamination (Laminação de Folhas) .....	23
3.6	Material Extrusion (Extrusão de Material).....	25
3.7	Directed Energy Deposition (Deposição de Energia Direcionada) .....	25
3.8	Hybrid (Híbrido).....	27
4	Contexto Atual .....	29
5	A Fabricação Aditiva na Arquitetura .....	33
5.1	Winsun .....	33
5.2	Stone Spray .....	33
5.3	D Shape .....	35
5.4	Apis Cor .....	35
5.5	Contour Crafting.....	39
5.6	SOM - Oak Ridge National Laboratory .....	39
5.7	FIMAtec e IAAC.....	41
6	Conclusão .....	47



7	Esboço / Protótipo .....	51
7.1	O Material .....	53
7.1.1	ECC.....	53
7.1.2	Functionally Graded Materials .....	55
7.2	A Forma + O Software .....	57
7.3	O Hardware .....	65
7.3.1	Estrutura.....	65
7.3.2	Extrusor .....	67
7.3.3	Energia.....	67
7.3.4	Recipiente\Conector .....	67
7.3.5	Controlador .....	69
8	Reflexões Finais .....	71
9	Bibliografia .....	75
10	Fontes de Imagens .....	87



## **1 Introdução**

### **1.1 Âmbito da Investigação**

Esta tese, desenvolve-se no âmbito de uma das atuais tecnologias em desenvolvimento - A impressão em 3D - e em que escala poderá ser aplicada na área da construção num futuro próximo. A tese visa explorar os usos e possibilidades dos métodos de impressão 3D no futuro da Arquitetura, fazendo um estudo detalhado sobre obras já concebidas com estes métodos e mostrando a capacidade de processamento atual das impressoras 3D.

### **1.2 Metodologia**

A tese faz uma análise aprofundada dos métodos de Fabrico Aditivo baseando-se maioritariamente em artigos científicos, reportagens, revistas científicas, jornais e blogues. Após uma análise, determinou-se que as poucas monografias existentes sobre este tópico estavam extremamente desatualizadas. A natureza deste tópico obrigou ao uso deste tipo de referências, por forma a adquirirmos a informação mais atual possível. Fazendo uso de informações adquiridas por futurólogos e através do meu próprio sentido crítico, desenvolve-se especulações do que poderá ser o futuro destas tecnologias.

### **1.3 Objetivos**

Esta tese tem como objetivo principal determinar o futuro dos métodos de impressão 3D na área da construção edificatória, explorando as técnicas de Fabrico Aditivo assim como a fusão destes, com os métodos atuais usados na área da Arquitetura. Pretende-se descobrir as possibilidades de aplicação da impressão 3D na Arquitetura, fazendo um estudo detalhado sobre usos comuns destes métodos. Mostrando a capacidade de processamento atual das impressoras 3D, investiga, sobre o impacto que estas tecnologias poderiam ter nas áreas sociais, ecológicas, económicas e tenta entender a viabilidade destas técnicas para a construção de habitações. Também pretende incentivar ao desenvolvimento desses métodos de impressão 3D por forma a obtermos melhores ferramentas de trabalho, que por sua vez poderão contribuir ao alívio de



problemas que possam estar diretamente ou indiretamente relacionados com a Arquitetura. Por fim a realizar esta pesquisa científica, pretendo concretizar os seguintes objetivos:

- Entender a atualidade da impressão 3D;
- Fornecer uma visão esclarecida do que já existe no mercado a nível de técnicas de impressão 3D;
- Fazer uma distinção clara das várias famílias existentes dentro do processo de Fabrico Aditivo;
- Determinar a viabilidade das tecnologias atuais para a construção edificatória;
- Propor uma fusão de tecnologias emergentes com intuito a desenvolver uma ferramenta de Fabrico Aditivo viável para a Arquitetura;

#### **1.4 Estrutura da Tese**

A tese divide-se essencialmente em três partes, sendo a primeira introdutória, seguida de uma parte de desenvolvimento e por fim uma parte de conclusão.

A primeira parte, intitulada "O Que é AM (Additive Manufacturing) ?" faz um esboço breve da história da criação da primeira impressora 3D. A impressora era vista como uma simples ferramenta "rapid prototyping tool" pelo seu autor, o Charles W. Hull (1986), sendo que somente hoje começamos a entender o potencial que esta tecnologia tem para oferecer. Esta parte faz também uma descrição dos vários processos de impressão 3D, assim como as suas vantagens e usos na atualidade. Passando de seguida para uma análise do desenvolvimento atual desses processos na área da Arquitetura. A lista de técnicas de Fabrico Aditivo aplicadas à Arquitetura e as suas descrições contém exemplos como 'Winsun', 'D-Shape' e 'Stone Spray', empresas ou projetos privados que já mostram alguma capacidade de processamento. Esta secção, pretende principalmente dar-nos algum conhecimento acerca das impressoras 3D. Tal é necessário para entendermos que opções tecnológicas já se encontram disponíveis para o desenvolvimento de uma nova ferramenta de processamento edificatório.

Numa segunda parte desta tese, pretende-se descobrir as possibilidades do uso destes materiais, mais conhecidos por ECC (Engineered Cementitious Composites), na área da Arquitetura.





Recorrendo a softwares de análise de elementos finitos, a estudos de formas geométricas e aos ECC por forma a reforçar falhas estruturais dos métodos de Fabrico Aditivo, pretende-se desenvolver uma potencial ferramenta de construção edificatória.

Numa terceira e última parte, reflete-se sobre os resultados atingidos com esta tese, clarificando a realidade do uso dos métodos de Fabrico Aditivo na Arquitetura, expondo se estes métodos poderão ser viáveis ou não para a construção do edificado e que pormenores poderiam ser retificados ou melhorados.



## 2 O que é AM?

Esta primeira parte é dedicada a uma introdução do Fabrico Aditivo, expondo as potencialidades e aplicabilidade dessas técnicas em várias áreas. Seguido de uma catalogação detalhada dessas técnicas de Fabrico Aditivo, a fim de simplificar o entendimento dos seus processos. Faz-se também uma contextualização das tecnologias 3D atuais e por fim analisa-se uma série de casos de estudos que já se encontram em funcionamento para mostrar as suas aplicações na Arquitetura.

Additive Manufacturing ou Fabrico Aditivo é a denominação usada para descrever o processo de criar objetos tridimensionais através de uma ferramenta computadorizada. As suas técnicas são variadas mas os processos de impressão são extremamente similares na sua essência. O Fabrico Aditivo surgiu como uma resposta oposta ao Fabrico Subtrativo. Por Fabrico Subtrativo, trata-se do método onde criamos um objeto desbastando uma matéria-prima de maiores dimensões que o próprio objeto.

A primeira ferramenta de Fabrico Aditivo que inspirou a produção das impressoras 3D foi desenvolvida e patenteada (ver anexo A) nos anos 80 pelo Americano Charles W. Hull. Era vista como uma simples ferramenta de prototipagem rápida que usa a técnica de esterolitografia. Esta técnica enquadra-se na família de Vat Photopolymerization (Fotopolimerização em Cuba), processo que irei explicar mais detalhadamente num próximo tópico. O desenvolvimento dessa tecnologia levou-nos a descobrir as suas grandes vantagens, nomeadamente, a velocidade de produção de peças e a economia no que toca a matéria-prima. A ferramenta de prototipagem rápida tornou possível a produção de peças de extrema complexidade num tempo mínimo.

Desde então, com o passar de algumas décadas, o Fabrico Aditivo tem vindo a ser desenvolvido exponencialmente, dando forma a várias técnicas. Só hoje em dia é que começamos a entender o verdadeiro potencial desta tecnologia, levando a questionarmos a possibilidade de aplicarmos esta tecnologia na área da Arquitetura.

Independentemente da técnica, o Fabrico Aditivo consiste em depositar, curar ou soldar uma matéria camada a camada. Numa placa ou grelha horizontal, a impressora deposita uma primeira camada, movendo-se nos eixos X e Y. Reajustando a sua cota, movendo-se no eixo Z, prossegue para a impressão da segunda camada do objeto, repetindo esse processo até completar a peça desejada.



### **3 As Famílias do Fabrico Aditivo**

Como referi anteriormente, neste tópico iremos abordar as diferenças encontradas nas técnicas de impressão 3D que conhecemos hoje em dia, estando mais focado nas pequenas diferenças que enquadram estas técnicas em famílias de impressão diferentes.

Os processos na sua generalidade são extremamente similares, usando um mapeamento virtual para se guiarem nos eixos X, Y e Z. Geralmente, irão ter uma placa ou recipiente (cuba) para receber ou curar o material e produzirão o objeto por camadas. Até hoje, foram distinguidas oito famílias diferentes de impressão 3D, questão que irei expor mais detalhadamente nas alíneas abaixo.

#### **3.1 Vat Photopolymerization (Fotopolimerização em Cuba)**

Esta técnica faz uso de uma cuba que é inicialmente cheia de resina, sendo que no final de cada impressão, a resina terá que ser reposta para garantir o bom funcionamento da impressora. Com um laser ou projetor de luz ultra violeta (UV), cura-se seletivamente a resina, iniciando assim o processo de Fotopolimerização por forma a criar o objeto desejado. Após ser curada a primeira camada, é rebaixada a plataforma que se encontra na cuba para proceder à impressão da sucessiva camada.

Esta foi a técnica patenteada pelo Charles W. Hull e tem como vantagens, um elevado nível de detalhes e acabamentos lisos.

#### **3.2 Powder Bed Fusion (Sinterização Seletiva Por Laser)**

A Sinterização Seletiva Por Laser funciona de forma similar à Fotopolimerização em Cuba no sentido em que o objeto final estará sempre rodeado de matéria-prima. Enquanto na Fotopolimerização o objeto encontra-se em resina, na Sinterização Seletiva o objeto encontra-se rodeado de pó. A matéria-prima utilizada em pó pode variar de materiais, sendo eles geralmente polímeros, metais, areias ou alguns tipos de cimento.

Quanto ao processo, um rolo deposita e alisa uma pequena camada de matéria, sendo que este processo será repetido para cada camada. Após se regularizar a camada, um laser derrete a matéria para formar a peça desejada, passando de seguida para a camada sucessiva.



Este processo tem como vantagens, usar de uma grande variedade de materiais e a capacidade de produzir objetos com um elevado nível de complexidade.

### **3.3 Binder Jetting (Jato de Agente Aderente)**

Assim como a Sinterização Seletiva Por Laser, Binder Jetting usa matérias-primas sob forma de pó, dando-lhe a mesma vantagem de poder utilizar uma grande variedade de materiais.

Mais uma vez, Binder Jetting aparenta ser similar à Sinterização Seletiva Por Laser fazendo uso de um rolo para depositar e alisar uma pequena camada de matéria. A grande diferença deste processo é que em vez de utilizar um laser para derreter a matéria-prima, deposita uma cola que irá aglomerar o pó. Este processo é reproduzido sucessivamente até se formar o objeto final. Em algum dos casos como o barro ou metais, o objeto pode ser aquecido por forma a curar o objeto na sua totalidade, dando-lhe melhor grau de resistência.

### **3.4 Material Jetting (Jato de Material)**

Material Jetting é um dos processos que apresentou uma grande vantagem em relação aos outros, tendo a capacidade de imprimir vários materiais numa peça só. Com esta vantagem, é possível criar peças com partes duras e partes moles, sendo possível obter objetos flexíveis.

Ao contrário dos processos referidos anteriormente, Material Jetting não cola ou derrete a matéria-prima para formar o objeto. Em vez disso, deposita a matéria-prima sob forma de gotas numa placa por forma a obter a peça final. O material depois é curado com uma luz ultravioleta ou a temperatura ambiente.

Apesar da sua grande vantagem em relação aos outros métodos de impressão 3D, Material Jetting apresenta a desvantagem de ter que imprimir o suporte da peça para esta não perder a sua forma durante o processo de solidificação. O suporte, aparenta ter similaridades com as de um molde, podendo ser reutilizado para outros propósitos ou simplesmente descartado no final da operação.

### **3.5 Sheet Lamination (Laminação de Folhas)**

Como o nome indica, este processo usa matéria-prima em forma de lâminas enroladas, geralmente metais, papéis ou polímeros. O rolo é montado na impressora e preso a um segundo





rolo vazio na outra extremidade da impressora. Funciona um pouco como os filmes das máquinas fotográficas analógicas, à medida que se vai usando o rolo limpo, vai se enrolando a parte usada para dar espaço à parte inutilizada.

Um laser ou lâmina recorta o material necessário deixando-o numa plataforma que se encontra por baixo da zona de corte. O rolo é enrolado para alimentar a zona de corte com matéria-prima nova e o processo é repetido novamente até finalizar a peça. À medida que as folhas são recortadas e depositadas por baixo da zona de corte a plataforma é rebaixada para dar espaço às folhas sucessivas. As folhas vão sendo soldadas ou coladas (dependendo do material) à medida que vão sendo recortadas. Assim como Binder Jetting, no final a peça pode ser levada a um forno para curar ou soldar o objeto na sua totalidade.

### **3.6 Material Extrusion (Extrusão de Material)**

A Extrusão de Material é o processo mais comum, que se encontra facilmente hoje em dia, são as impressoras que geralmente qualquer pessoa pode ter em casa por serem acessíveis, assim como as matérias utilizadas. Geralmente, estas impressoras utilizam polímeros como matérias-primas, sob forma de filamento mas podem ser adaptadas para vários tipos de materiais. Alguns filamentos metálicos já foram introduzidos no mercado para este tipo de impressoras para oferecer uma maior versatilidade de impressão. Assim como diferentes tipos de cabeçotes foram adaptados a este tipo de impressoras, como exemplificam os FoodInk fazendo uso de uma seringa para imprimir produtos alimentares.

Um ou vários cabeçotes de impressão (geralmente um só) são alimentados pelo filamento que é depois depositado numa placa. O cabeçote funciona de forma similar a uma pistola de cola quente, derretendo o material. À medida que a peça vai sendo impressa, o material vai curando a temperatura ambiente.

### **3.7 Directed Energy Deposition (Deposição de Energia Direcionada)**

Assim como Material Jetting, a Deposição de Energia Direcionada apresenta uma grande particularidade em relação a todas as outras técnicas. Enquanto todos os processos referidos anteriormente orientam-se pelos eixos X, Y e Z devido aos carris que suportam o sistema, a Deposição de Energia Direcionada faz uso de um braço robótico, permitindo assim uma maior liberdade de movimentos e uma capacidade de criar formas infinitas.



Em relação ao processo, a base é relativamente simples, trata-se de uma máquina de solda automatizada. Na extremidade do braço robótico encontra-se o cabeçote, que é depois movimentado pelo programa, seguindo as formas definidas. O cabeçote tem geralmente quatro orifícios, que visto em plano, formam um triângulo equilátero com um dos orifícios no centro. O orifício central é o laser que solda a matéria-prima, enquanto os outros três orifícios alimentam o laser. A matéria-prima, geralmente um metal sob forma de pó ou fio, é projetado com uma inclinação específica, formando virtualmente uma pirâmide triangular regular. Ao mesmo tempo é projetado o laser, encontrando-se com a matéria no eixo da “pirâmide virtual”, formando a solda que é aplicada ao objeto.

### **3.8 Hybrid (Híbrido)**

Esta técnica consiste num simples cruzamento de qualquer um destes processos de impressão 3D com a tecnologia CNC. Como sabemos, as impressoras 3D e máquinas CNC têm grandes vantagens em comparação com a velocidade de produção das técnicas tradicionais.

Mesmo sendo este o caso, a junção dos dois tipos de processo, impressão 3D e CNC, aparenta ser a solução mais rápida devido ao maior grau de desenvolvimento das tecnologias CNC.



**Fig.1:** Asa de um Boeing 777X a ser impressa pela Oak Ridge National Laboratory.



**Fig.2:** Veículo elétrico "Strati" criado pela empresa Local Motors.



**Fig.3:** Exemplo da técnica utilizada pelos Food Ink.

## 4 Contexto Atual

Esta tese, pretende investigar sobre uma das atuais tecnologias em desenvolvimento - A impressão 3D - e em que escala poderá ser aplicada na área da construção num futuro próximo.

Desde os primórdios da civilização, a forma como construímos edifícios tem vindo a sofrer alterações, sendo que sempre definido pela nossa capacidade tecnológica. Da mesma forma, assistimos hoje ao florescer de uma dessas alterações na nossa capacidade tecnológica, questão que se começa a fazer notar em várias áreas para além da Arquitetura, levando-nos a questionar se esta levar-nos-á para uma nova era da construção.

Hoje em dia, a impressão 3D começa a desempenhar um papel importante em várias indústrias, nomeadamente, aeronáutica, aeroespacial, automóvel, design, culinária, medicina, etc. Aos poucos, começamos a entender a verdadeira potencialidade destes novos métodos de Fabrico Aditivo e as grandes vantagens que estes podem trazer.

A Oak Ridge National Laboratory já demonstrou as vantagens do uso destas técnicas e afirmam terem sido capazes de imprimir uma asa de um Boeing 777X em compósito termoplástico constituído por ABS e fibra de carbono (**Fig.1**). Processo este que durou umas meras 30 horas em oposição aos processos tradicionais que necessitam aproximadamente 3 meses.

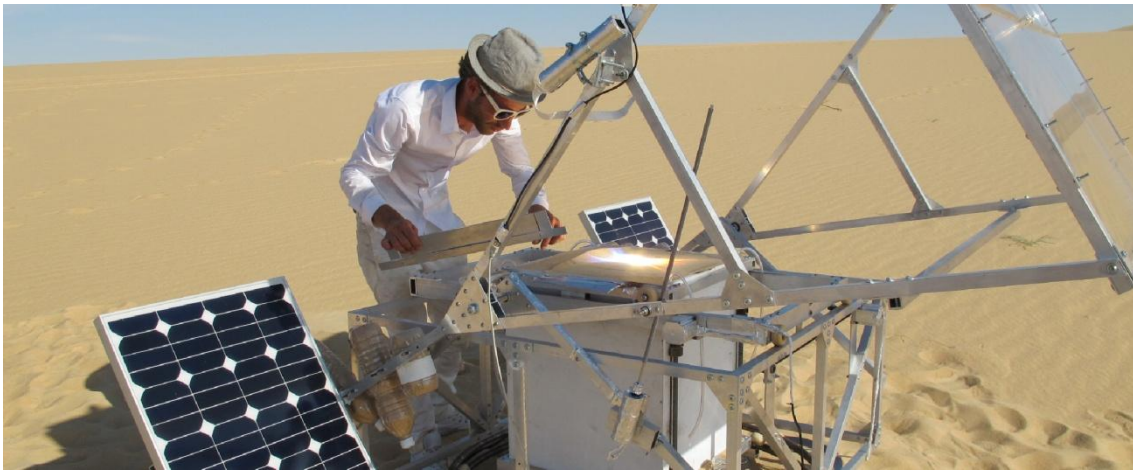
A Local Motors que foi capaz de produzir um carro elétrico completamente funcional com estas técnicas. O automóvel, intitulado Strati (**Fig.2**), que é composto por somente 40 peças e foi impresso em 44 horas. As suas componentes elétricas foram retiradas de um Renault Twizy. Suspensões e outras componentes mecânicas vieram de diferentes empresas.

A Food Ink que é uma equipa de cozinheiros capaz de imprimir os seus pratos culinários, usando alimentos em forma de mousses ou pastas, por forma a criar receitas esteticamente espetaculares (**Fig.3**).

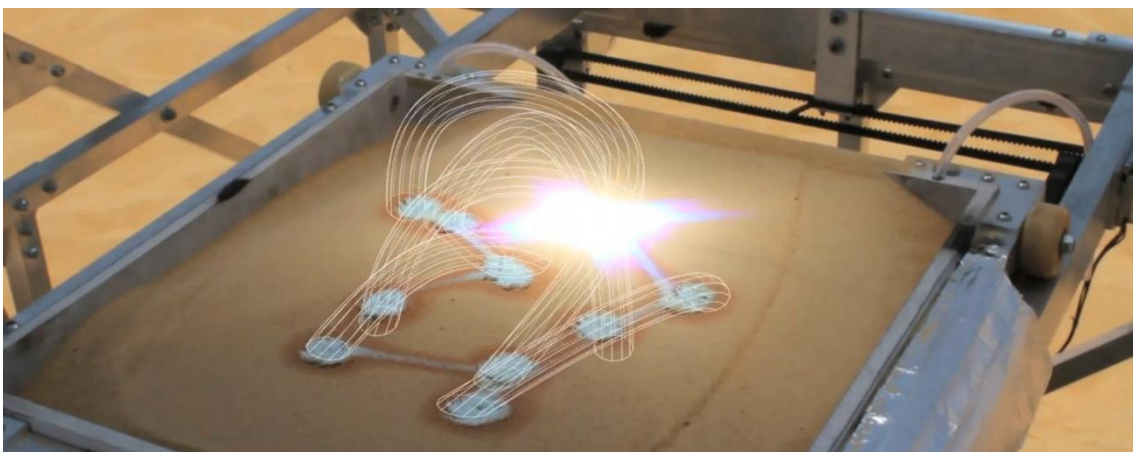
Estes são meros exemplos das potencialidades que as tecnologias de impressão 3D são capazes de trazer as indústrias. O seu desenvolvimento na Arquitetura poderia sem dúvida vir a ser benéfico, resolvendo vários problemas, nomeadamente, nos sectores económico, social, artístico e, obviamente, tecnológico.



**Fig.4:** Secção de um edifício a ser impressa no armazém da Winsun.



**Fig.5:** Markus Kayser e a sua impressora solar (Solar Sintering)



**Fig.6:** A Solar Sintering durante o processo de impressão de um objeto.

Sabemos que na nossa atualidade, uma grande percentagem da população mundial vive em condições precárias. Oprimidos por falta de meios económicos, tendo que se cingir ao pouco que podem suportar financeiramente.

Neste ponto, o Fabrico Aditivo poderia participar ativamente, fornecendo residências aceitáveis dentro dos parâmetros standard e moralmente corretos. Tal seria possível usando materiais adquiridos localmente e posteriormente transformados em matéria-prima utilizada pelas impressoras 3D. A mão-de-obra barata em conjunto com estas técnicas e materiais económicos permitiriam uns gastos monetários mínimos, criando assim, lares de baixo custo e portanto acessíveis a classes etárias mais desfavorecidas.

Todos os anos, milhões de pessoas são forçadas a fugir das suas casas devido a problemas como a guerra, desastres naturais, entre outros. Infelizmente, a maioria dessas pessoas acabam em campos de refúgio com condições muito precárias, onde permanecem vários meses, antes de serem colocadas em habitações mais permanentes. A capacidade de resposta dos métodos de Fabrico Aditivo poderiam ter um papel importante, providenciando logo de partida residências aceitáveis que pudessem mais tarde ser convertidas para soluções permanentes.

A empresa Chinesa, Winsun (**Fig.4**) já comprovou ser possível imprimir dez casas em 24 horas através das suas técnicas, tornando as impressoras 3D num instrumento viável para a produção de edifícios.

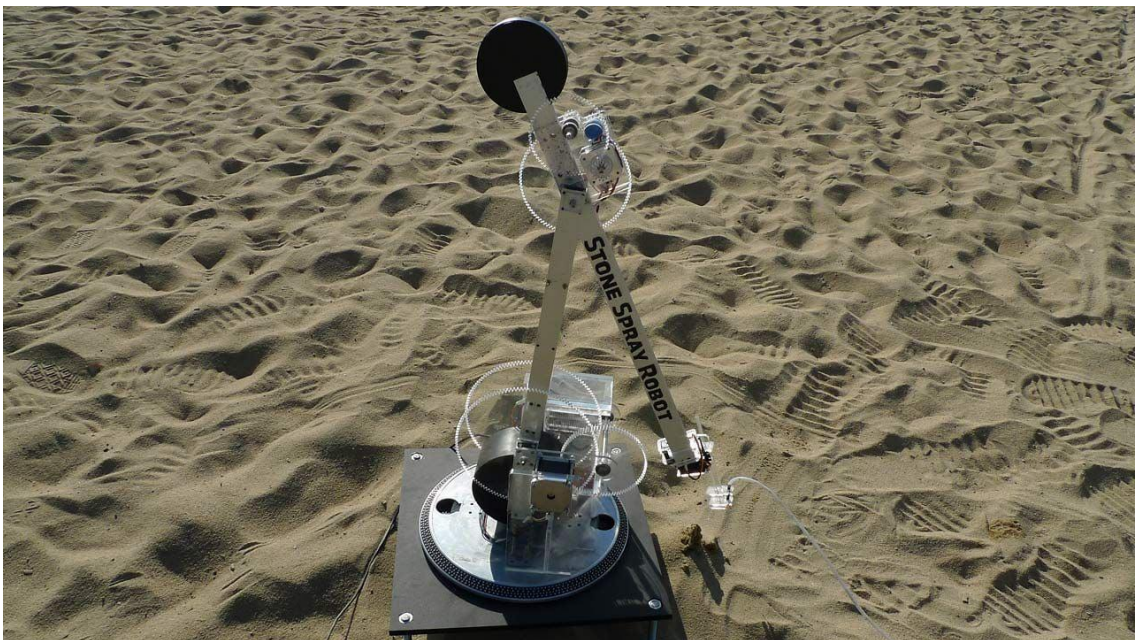
Uma das mais ambiciosas e empolgantes aplicações para impressão 3D é a capacidade de trabalhar em algumas das mais impiedosas condições climáticas ou localizações remotas do planeta que tornavam difícil o provisionamento de matérias-primas para a construção.

Neste caso, a ideia seria utilizar materiais já presentes no local como exemplifica Markus Kayser (**Fig.5**) com a sua impressora de Sinterização Solar, capaz de criar formas a partir de areia derretida no meio do Deserto do Sahara (**Fig.6**).

O Fabrico Aditivo vem também trazer novas formas de pensarmos à própria Arquitetura, ganhamos uma flexibilidade incrível no que toca à facilidade como podemos agora fazer paredes curvas a custos muito mais acessíveis do que anteriormente com técnicas tradicionais. Dando-nos assim a possibilidade de produzir edifícios já com condutas de água e eletricidade integradas nas paredes e lajes. Esta técnica permite-nos inovar nas formas geométricas usadas na construção e no tipo de materiais que possam ser diferentes dos utilizados na Arquitetura tradicional.



**Fig.7:** Edifício impresso e montado pela companhia Winsun.



**Fig.8:** Impressora 3D Stone Spray.



## 5 A Fabricação Aditiva na Arquitetura

### 5.1 Winsun

Empresa chinesa com sede em Xangai, que desenvolveu uma impressora 3D capaz de imprimir objetos de grandes dimensões.

Usa uma técnica de extrusão de material usada maioritariamente para a produção de objetos de grande porte, com a possibilidade de ser aplicada à Arquitetura. Funciona de forma similar às impressoras 3D correntes que se encontram atualmente no mercado e acessível a todos. Mas com as vantagens de ter a capacidade de utilizar materiais usados na construção comum, nomeadamente, o cimento e o barro. Tem a vantagem de ser uma alternativa barata e rápida em comparação com os métodos tradicionais.<sup>1</sup> Adicionalmente, também não necessita de moldes para criar paredes estáveis. A desvantagem é que todas as peças são impressas em armazém, sendo depois transportadas para o local da obra e montadas (**Fig.7**) fazendo uso de guias e mão-de-obra como nos métodos tradicionais.

### 5.2 Stone Spray

É um braço robótico (**Fig.8**) inventado pelos estudantes Anna Kulik, Inder Shergill e Petr Novikov do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha em Barcelona. A impressora usa o processo de Binder Jetting com algumas alterações, tornando-o um pouco distinto do processo tradicional que já conhecemos. Uma das grandes diferenças é o uso de um braço robótico em oposição aos tradicionais carris que movimentam o cabeçote nos três eixos axiais. Outra alteração incomum é o facto de a própria impressora fazer a mistura dos materiais,<sup>2</sup> um pouco como a Deposição de Energia Direcionada, em vez de simplesmente depositar o agente adesivo na matéria-prima.

Este robô opera projetando areia através de um orifício do cabeçote e um agente adesivo por outro, fazendo com que essa mistura se solidifique entrando em contacto com o solo. Em contradição, a maior parte das impressoras 3D, este braço robótico não se move somente nos 3 eixos axiais, tornando possível a impressão em superfícies verticais.

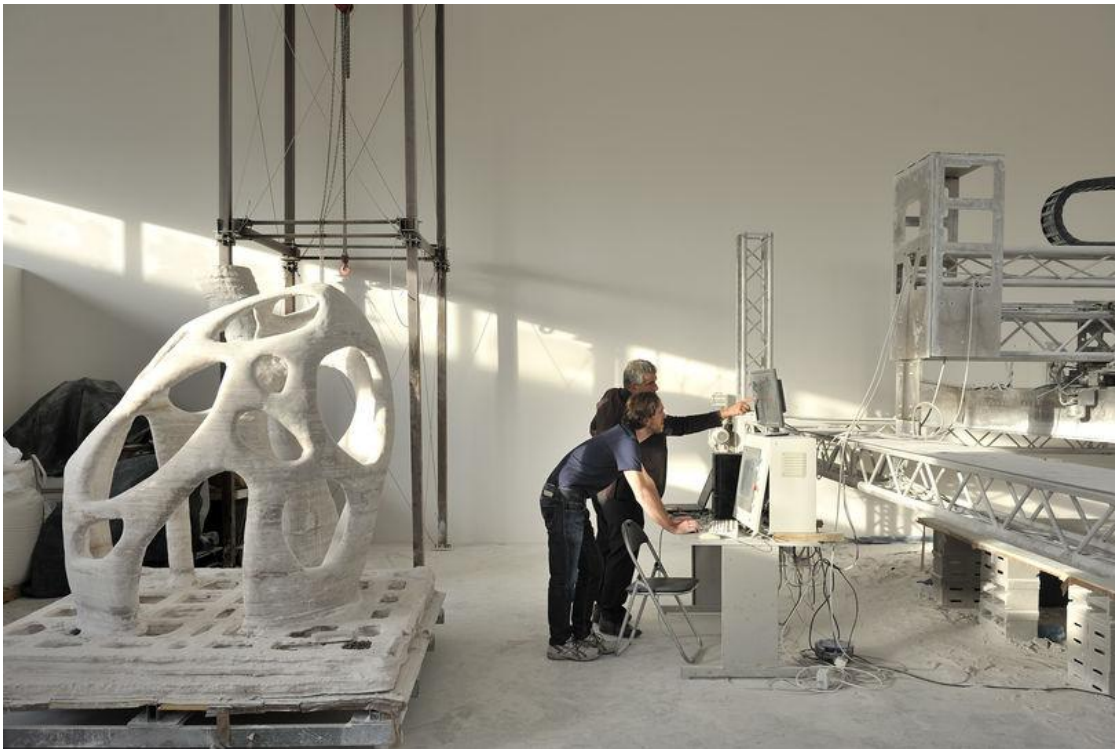
---

<sup>1</sup> Davison N. (2016, November 3) 3D-printed cities: is this the future? Retrieved from <https://www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture>

<sup>2</sup> Blog Oficial do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. Retrieved 2016, December 12 from <http://www.iaacblog.com/programs/stone-spray/>



**Fig.9:** Enrico Dini e a sua impressora D Shape.



**Fig.10:** Objecto impresso pela D Shape, Enrico Dini e um colaborador.

### 5.3 D Shape

Inventada por engenheiro Italiano Enrico Dini (**Fig.9**), esta impressora funciona extrudindo um agente líquido adesivo numa superfície arenosa através de vários cabeçotes. É capaz de imprimir componentes tão largas quanto 6m x 6m x 6m mas o seu conceito de impressora pode ser aplicado a escalas maiores, possibilitando a sua aplicação na área da Arquitetura e da construção.

A D Shape aparenta ter uma grande vantagem em relação a Winsun, sendo que é capaz de imprimir no local da obra, devido a ser relativamente fácil transportar a impressora. Essa grande vantagem permite construir edifícios em zonas remotas e de difícil acesso.

Numa fase inicial, a D Shape deposita uma camada fina de areia e outras substâncias que formam a mistura específica para garantir uma boa adesão dos componentes. Seguidamente, os cabeçotes depositam gotas de agente adesivo, à base de magnésio<sup>3</sup>, por forma a solidificar a solução. Após estes primeiros passos, a primeira camada está concluída, podendo assim seguir para etapa seguinte. A mistura é depositada de forma cirúrgica, garantindo uma superfície homogénea e ideal para ser impressa a camada sucessiva. O processo é depois repetido nas camadas superiores, até adquirir-se o objeto desejado (**Fig.10**). No final, o excesso de material é removido cuidadosamente e guardado para futuras impressões, garantindo um gasto mínimo da mistura cuidadosamente calculada. Por fim deixa-se a peça repousar durante um período de 24 horas por forma a secar completamente.

### 5.4 Apis Cor

A Apis Cor é uma das companhias que desenvolveu uma impressora 3D que mais se aproxima à impressão de edifícios na sua totalidade. Trata-se de uma impressora capaz de produzir paredes interiores e exteriores de um edifício com uma área máxima de 132 metros quadrados.<sup>4</sup>

Por uma impressora que se aproxima à impressão de edifícios na sua totalidade, refiro-me ao facto de requerer a presença de operadores para construir o edifício na sua totalidade.

---

<sup>3</sup> Davison N. (2016, November 31, 3D-printed cities: is this the future? Retrieved from <https://www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture>

<sup>4</sup> Site Oficial da Apis Cor. Retrieved 2017, Mai 23 from <http://apis-cor.com/en/faq/technicheskie-xarakteristiki-3d-printera/>



**Fig.11:** Impressora da Apis Cor em processo de impressão.



**Fig.12:** Pormenor da forma da parede e peças estruturais.

Geralmente, o processo requer um operador para depositar e instalar a estrutura metálica do edifício, assim como a estrutura das portas e janelas e outro para controlar que o processo de impressão está a decorrer conforme os parâmetros.

Uma das particularidades desta impressora é a sua forma, ao contrário da maioria das impressoras 3D, a Apis Cor optou por uma forma em grua (**Fig.11**), sendo que grande parte das empresas opta por uma estrutura em pórtico. Esta particularidade concede-lhes a vantagem de transporte fácil da impressora, tornando o problema de imprimir o edifício ou secções deste no local da obra uma questão irrelevante.

A aparência de grua da impressora leva a ser centrada no meio da zona de impressão, imprimindo nos 360 graus que a rodeia graças ao braço giratório. A superfície onde é impresso o modelo não passa de uma fundação simples, executada com os métodos de construção tradicionais. A impressora é depois depositada na superfície e estabilizada através do seu sistema automatizado. Todo o processo de instalação demora cerca de trinta minutos e inclui depositar a impressora, conectar ao gerador e preparar o silo com a mistura de cimento especificada pela companhia.

Inicia-se o processo de impressão e um operador vai depositando as peças que constituem a estrutura metálica (**Fig.12**) assim como a estrutura das portas e janelas. Após atingir os 3300mm (limite da impressora), é feita a laje do segundo andar em ferro-cimento. A impressora é depois movida para o andar superior e automaticamente centrada, prosseguindo para a impressão das paredes do segundo andar. Os acabamentos finais são aplicados conforme os métodos tradicionais empregues na atualidade.



**Fig.13:** Behrokh Khoshnevis criador da impressora Contour Crafting.



**Fig.14:** Impressora Contour Crafting no processo de impressão.

## 5.5 Contour Crafting

Contour Crafting é um sistema de impressão 3D criado pelo Behrokh Khoshnevis (Fig.13), professor e diretor da CRAFT (Center for Rapid Automated Fabrication Technologies) na Universidade do Sul da Califórnia. A impressora tem uma estrutura em pórtico, como grande parte das impressoras 3D e usa o sistema de Extrusão de Material (Fig.14).

A grande diferença entre Apis Cor e Contour Crafting, para além do facto de uma impressora ser em forma de grua e a outra em pórtico, é que a Apis Cor requer um operário para aplicar as peças de fábrica enquanto Countour Crafting executa essas operações com um sistema automatizado.<sup>5</sup>

Esta tecnologia tem capacidade para imprimir no local da obra, poupando no transporte de materiais pesados como no caso da empresa chinesa Winsun. Apesar de poder imprimir no local de obra, algumas peças têm necessariamente que ser transportadas para poder completar a impressão do edifício. O terreno é preparado com métodos tradicionais e somente após isso é que a impressora é montada. As paredes começam a ser impressas, enquanto um braço robótico deposita as estruturas das portas e janelas. Após a conclusão do primeiro piso, o mesmo braço robótico que instalou as estruturas das janelas e portas, deposita as peças constituintes da laje transportadas da fábrica. Inicia-se o processo de impressão do segundo piso e seguindo sucessivamente pelo resto dos andares até completar o edifício. Com a estrutura impressa, o edifício está pronto para receber os acabamentos finais.

## 5.6 SOM - Oak Ridge National Laboratory

A SOM ou Skidmore, Owings & Merrill LLP é uma das maiores empresas de engenharia e Arquitetura dos Estados Unidos, desenvolveu um projeto em conjunto com a ORNL que irei expor abaixo.

A Oak Ridge National Laboratory é um centro de pesquisas apoiado pelo governo americano e foca-se em vários sectores científicos sendo que um deles é dedicado a impressoras 3D. Ao contrário dos exemplos anteriores, não se trata de uma companhia ou entidade que presta serviços mas um centro dedicado ao desenvolvimento científico e tecnológico.

---

<sup>5</sup> Site Oficial da Contour Crafting. Retrieved 2017, February 17 from <http://contourcrafting.com/building-construction/>



**Fig.15:** Edifício e veículo desenvolvido e impresso pela SOM e ORNL.



**Fig.16:** Edifício a ser preparado para o transporte.



Desenvolveram um edifício alimentado por um veículo elétrico impresso nos seus laboratórios (**Fig.15**). Assim como o veículo, o edifício foi impresso no laboratório e transportado posteriormente para o local (**Fig.16**). Devido à improbabilidade de se poder transportar um edifício, este foi impresso em secções com forma de C e peças de montagem rápida para facilitar o transporte. Cada forma em C é pré-tencionada com varas de aço ao longo de seu eixo fraco, sendo projetado para resistir cargas de acordo com o código de construção. Cada costela interna possui painéis isoladores que proporcionam o maior isolamento para um menor espaço, oferecendo assim uma solução compacta.<sup>6</sup> A energia é fornecida pelos painéis fotovoltaicos e o gás natural por gerador localizado no veículo impresso. Os painéis fotovoltaicos carregam a bateria do edifício enquanto equipamentos como a cozinha ou escritório não estão em uso. A energia flui entre o edifício e o veículo, sendo que se um estiver em falta, será compensado pelo outro.

## 5.7 FIMAtec e IAAC

Alguns dos exemplos que irão agora ser expostos não foram apresentados anteriormente devido ao seu estado precário de desenvolvimento ou inexistência de mais informação. Ir-me-ei focar em somente dois exemplos, um deles sendo uma empresa finlandesa intitulada FIMAtec e de um segundo exemplo, sendo o IAAC<sup>7</sup> (Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha).

Passando então para um exemplo de natureza mais experimental, iremos ver tecnologias desenvolvidas num ambiente académico e de pura investigação. O IAAC é um instituto que visa descobrir os futuros métodos de produção edificatória, através da produção digital e tecnológica. Irei agora expor os dois exemplos do IAAC que me pareceram ser de maior relevância, um é intitulado de Mataerial<sup>8</sup> e o outro Minibuilders<sup>9</sup>. Apesar das poucas informações existentes, irei tentar descrever e explicar o mais detalhadamente estes processos.

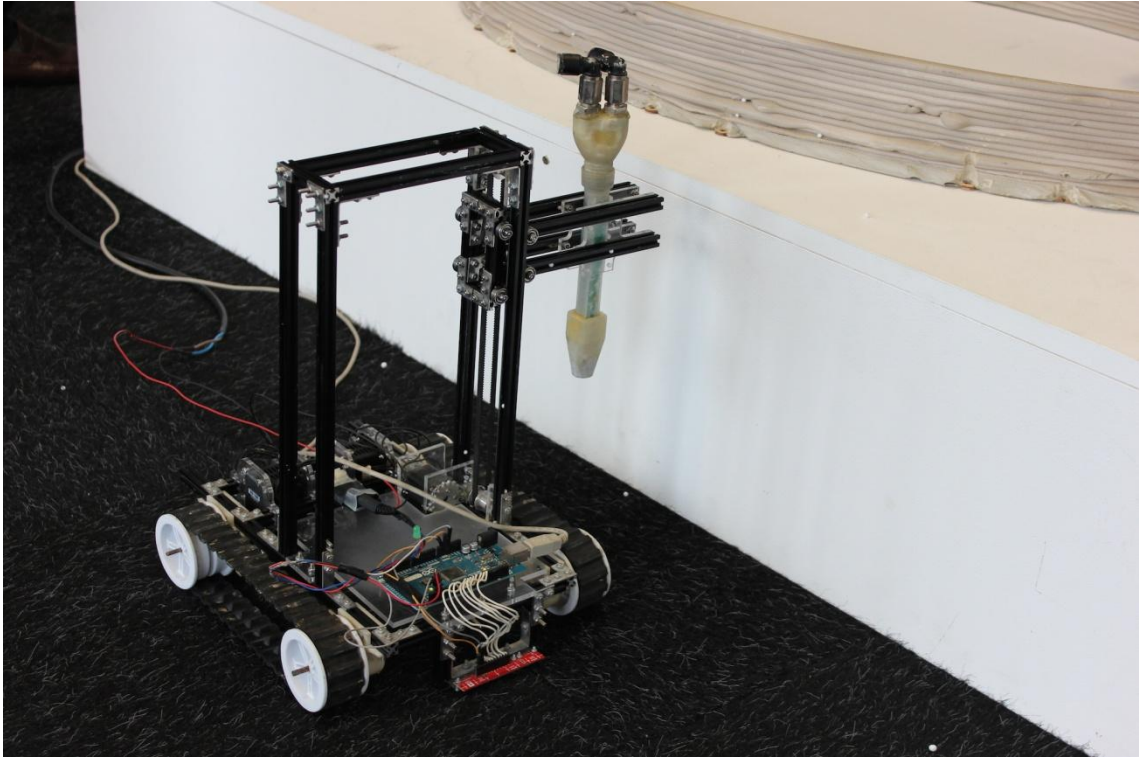
---

<sup>6</sup> Site Oficial da Skidmore, Owings & Merrill LLP. Retrieved 2017, February 15 from <http://www.multivu.com/players/English/7634251-skidmore-owings-merrill-3d-printed-building/>

<sup>7</sup> Site Oficial do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. Retrieved 2017, August 15 from <https://iaac.net/>

<sup>8</sup> Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. *Mataerial: Anti Gravity Additive Manufacturing*. Barcelona. Retrieved from <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>

<sup>9</sup> Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. (2013). *Minibuilders: Small Robots Printing Large Scale Structures*. Barcelona. Retrieved from <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>



**Fig.17:** Um dos mini robôs da equipa Minibuilders.



**Fig.18:** Robô em processo de execução.

Este exemplo do IAAC, intitulado Minibuilders, não foi escolhido pela sua técnica pois trata-se de uma simples extrusão mas sim pela sua visão inovadora. Os estudantes que desenvolveram esta tecnologia, explicam num vídeo<sup>10</sup>, que as impressoras 3D não têm que ser necessariamente de grande porte (Fig.17). Assim como poderiam ser várias impressoras, cada uma com uma tarefa diferente, em vez de uma só impressora para todas as tarefas. Segundo os estudantes que desenvolveram esta técnica, o objetivo era desenvolver uma família de robôs de construção em pequena escala, todos móveis e capazes de construir objetos muito maiores do que os próprios robôs (Fig.18). Assim como, cada um dos robôs desenvolvidos deveria realizar tarefas diversificadas, ligadas a diferentes fases da construção. O projeto Minibuilders é constituído de três robôs que exponho abaixo:

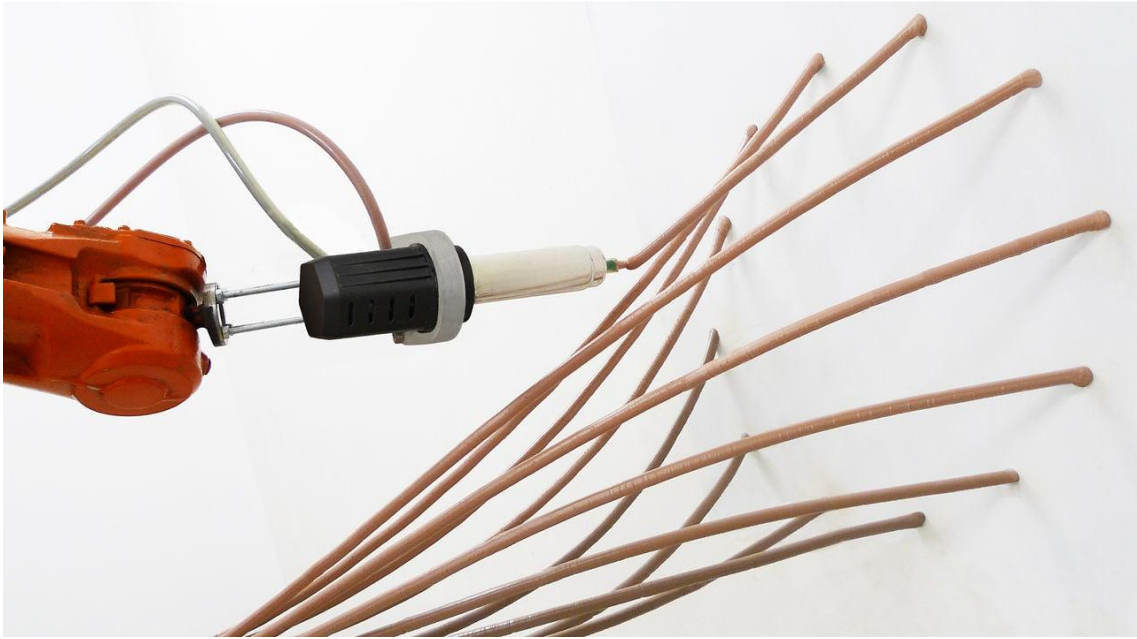
- O Foundation Robot é o primeiro robô a entrar no local de construção. Usando um sensor para detetar guias previamente demarcadas, este robô segue as linhas e curvas do projeto, depositando as primeiras camadas da estrutura. O cabeçote de impressão encontra-se na lateral do mini robô para que este não pise as secções já impressas e danifique a construção. Assim que o objeto fique mais alto que o alcance do robô, segue-se para a fase seguinte, introduzindo um robô de uma tipologia diferente.

- O Grip Robot grampeia-se no topo das primeiras camadas do objeto, depositadas pelo primeiro robô, fazendo uso de quatro rolos cilíndricos. Cada um desses rolos está conectado a atuadores rotativos e de direção, permitindo que o robô se posicione de forma precisa para continuar a imprimir a estrutura. Este robô usa sempre a estrutura previamente impressa como um suporte de aperto, sendo que o material precisa de secar de forma extremamente rápida para permitir que este aguente a próxima camada da impressão. Para tal, o Grip Robot usa decapadores térmicos para secar o material o mais rápido possível. Uma vez que a estrutura esteja completa, passa-se para a fase final, introduzindo-se o último robô.

- O Vacuum Robot é o último robô utilizado no processo de construção do grupo MiniBuilders. Ele usa uma ventosa para criar vácuo e permitir a sua fixação na superfície do objeto. O objetivo principal deste robô é reforçar a totalidade da estrutura que foi impressa. Para tal, ele desloca-se repetidamente para cima e para baixo da estrutura, imprimindo um material perpendicular às outras camadas, concedendo maior resistência à estrutura.

---

<sup>10</sup> Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. (2017, January 25). Minibuilders [video]. Retrieved from <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>



**Fig.19:** Impressora Mataerial no processo de impressão.



**Fig.20:** Apresentação do robô da FIMAtec.

A Anti Gravity Additive Manufacturing é uma nova tecnologia emergente que foi desenvolvida como um projeto acadêmico intitulado de Mataerial (**Fig.19**) no Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. Os estudantes Petr Novikov e Saša Jokić em conjunto com Joris Laarman Studio, desenvolveram esta nova tecnologia que consiste num braço robótico que permite a extrusão de material “ignorando as leis da física” como podemos observar no vídeo exemplificativo.<sup>11</sup> O material utilizado neste processo é de ordem desconhecida, mas é nos possível entender que faz-se uso de uma versão simplificada de decepadores térmicos para secar a substância. O uso destes utensílios permitem-lhes tornar a substância numa forma sólida poucos instantes após a extrusão, vencendo assim as leis da gravidade. Fazendo uso desta tecnologia sabiamente, poder-se-ia imprimir lajes ou telhados, questão que nunca foi possível anteriormente, devido à dificuldade deste processo.

Como referi anteriormente, a FIMAtec é um dos exemplos que apresenta resultados muito promissores com as suas técnicas de produção. Segundo o jornal finlandês, Helsingin Sanomat, o robô da empresa FIMAtec (**Fig.20**) é capaz de executar dez operações simultaneamente, produzindo paredes na sua totalidade.<sup>12</sup> O produto apresentado, num vídeo esclarecedor<sup>13</sup>, é um painel em sanduíche e é composto de uma estrutura em betão armado, isolamento térmico/acústico, cablagens elétricas e revestimento. A capacidade alucinante de produção deste robô foi somente capaz de ser atingida graças a uma fusão de tecnologias. Mais concretamente, dos processos de impressão 3D com as tecnologias da robótica, levando o robô a funcionar de forma similar às grandes linhas de montagem de automóveis. Atualmente, a companhia faz uso desta tecnologia para produzir secções de edifício que são depois transportadas para o local de obra, como alguns dos exemplos de companhias referidas nos tópicos anteriores. O principal desenvolvedor e fundador da FIMAtec, Arto Koivuharju, está confiante de que num futuro próximo conseguirão transportar esta tecnologia para o local de obra, baixando drasticamente os custos de transporte de material.

---

<sup>11</sup> Mataerial. (2017, January 25). Mataerial in action [video]. Retrieved from <http://www.mataerial.com/#3rdPage>

<sup>12</sup> Rissanen V. (2017, Mai 5). Finnish Fimatec Oy Launches the World's Largest 3D Printer Suitable for Construction Industry production. Helsingin Sanomat Press Release (English Version). Retrieved from <http://fimatec.fi/wp-content/uploads/2017/05/PressRelease170505.pdf>

<sup>13</sup> Finnish Intelligent Module Apartments. (2017, Mai 5). The RoboCatt Printer [video]. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=f\\_5TcUB8Sto](https://www.youtube.com/watch?v=f_5TcUB8Sto)



## 6 Conclusão

O capítulo, A Fabricação Aditiva na Arquitetura permitiu-nos ter uma visão generalizada do mercado de impressão 3D. Que tipo de impressoras estão à nossa disposição e o que elas são capazes de produzir. Neste tópico, pudemos ver mais detalhadamente os obstáculos que foram ultrapassados para chegarmos a estas impressoras e os que ainda ficam por ultrapassar para atingir o potencial máximo da impressão 3D na Arquitetura.

Quando ocorreu a “revolução” da impressão 3D, tal como aconteceu na Revolução Industrial tentou aplicar-se estas novas técnicas a tudo o que podíamos imaginar, levando a considerar o uso destas técnicas na Arquitetura. Desde então, tem-se vindo a tentar adaptar esta tecnologia aos requisitos da construção, de modo a tornar edifícios impressos numa realidade. O primeiro grande obstáculo observado, foi escalar as dimensões da nossa capacidade de impressão. Constatamos que as primeiras impressoras tinham somente a capacidade para imprimir objetos de pequeno e médio porte, e se alguma vez pretendíamos imprimir edifícios, teríamos que arranjar uma solução mais adequada. Uma das soluções exemplificada pela Winsun e a Oak Ridge Laboratory foi desenvolver uma estrutura em pórtico, o que permitiu criar em armazéns objetos de grandes dimensões. A impressão de secções e partes de edifícios tornou-se uma realidade, começando a ser produzidas peças de edifícios e transportadas para o local de obra para serem montadas. No entanto, outras companhias como a D Shape e Apis Cor pretendiam levar a tecnologia a um patamar superior, propondo uma impressora que pudesse ser transportada ao local de obra, reduzindo os custos do transporte dos materiais. Assim como a Apis Cor garante ser somente necessário um mínimo de dois operários para a impressão de um edifício de um andar segundo as técnicas deles, baixando ainda mais drasticamente os custos destes serviços.<sup>14</sup>

Geralmente, o grande problema encontra-se na execução do segundo andar, atualmente, as técnicas utilizadas pelas impressoras 3D não o permitem devido a questões estruturais. Apesar da dificuldade em resolver este problema, algumas companhias foram capazes de apresentar algumas soluções aceitáveis e dentro dos parâmetros de uma construção segura. Segundo a investigação, diria que atualmente existem três tipos de soluções para produzir edifícios fazendo uso da Fabricação Aditiva, sendo estas:

- Impressão de edifícios de pequeno porte que não necessitem de uma estrutura muito elaborada e sendo preferencialmente de um só andar.

---

<sup>14</sup> Site Oficial da Apis Cor. Retrieved 2017, August 15 from <http://apis-cor.com/en/faq/tehnologiya-stroitelstva/>





- Seccionamento do edifício em parcelas e peças de montagem rápida (solução utilizada pela Winsun). Todas as paredes e lajes são impressas nos armazéns, o aço é aplicado por operários e depois é tudo transportado para o local de obra. As peças são depois montadas por mão-de-obra humana com ajuda de guias e os acabamentos são feitos usando os métodos tradicionais;

- Construção usando um misto de técnicas, como a Apis Cor e a Contour Crafting. O terreno é preparado com métodos tradicionais, a impressora é instalada e inicia a impressão das paredes interiores e exteriores. Um ou vários operários aplicam o aço no betão, após o primeiro piso ser terminado inicia-se a construção da laje usando métodos tradicionais, no caso da Apis Cor ou aplicando peças anteriormente preparadas em armazéns, no caso da Contour Crafting. Inicia-se a impressão do segundo andar, deixando para trás os acabamentos que são depois aplicados por mão-de-obra humana.



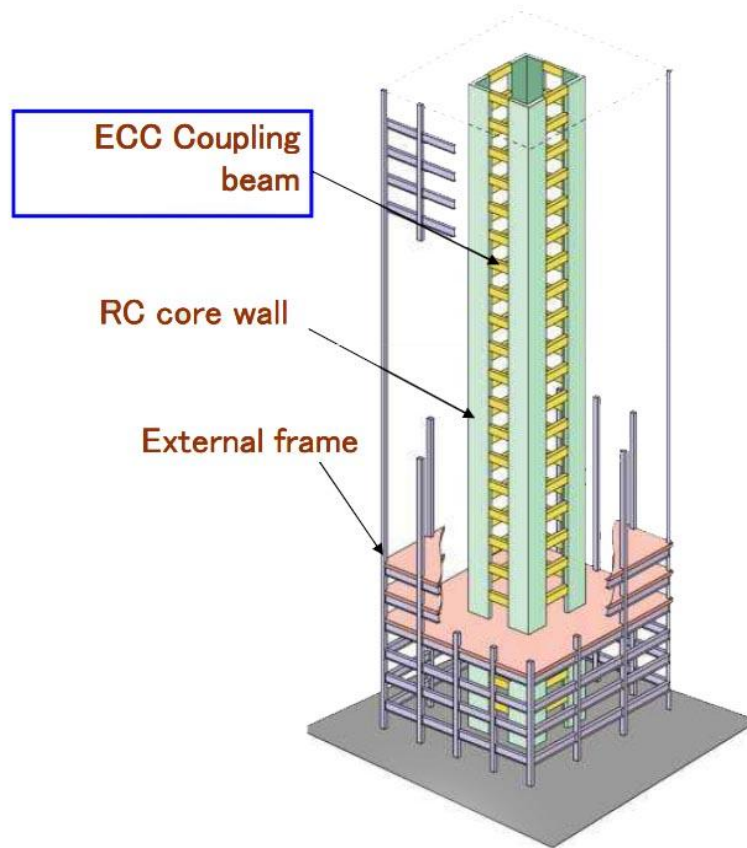
## 7 Esboço / Protótipo

A primeira parte, tendo sido introdutória, serviu para dar a conhecer a atualidade da impressão 3D e a sua aplicação na Arquitetura. Atualmente, nenhuma entidade possui a capacidade de imprimir edifícios na sua totalidade devido à dificuldade em produzir a parte estrutural de edifícios, questão que pudemos observar detalhadamente no capítulo anterior.

Neste capítulo, pretende-se criar um esboço/protótipo de uma impressora 3D capaz de produzir edifícios na sua totalidade. Por edifício na sua totalidade, entende-se, estrutura, paredes interiores e exteriores e cobertura. Procura-se entender se existe alguma forma de superar esta barreira e tornar os métodos de Fabrico Aditivo uma ferramenta viável para a construção edificatória. Revendo o conceito de betão e analisando algumas variantes deste material utilizado na construção, tenta-se chegar à solução mais adequada para estas tecnologias de Fabrico Aditivo.

Como sabemos, hoje em dia o uso do aço no betão é necessário para construir uma estrutura segura e estável. Até agora, as impressoras 3D foram incapazes de resolver essa questão, sendo sempre necessário mão-de-obra humana para aplicar o aço. Esta questão, levamos a entender que existe um problema de incompatibilidade entre as tecnologias de impressão 3D e os métodos construtivos atuais. Reformulando melhor o problema, chegou-se à conclusão que um destes dois fatores (tecnologias de impressão 3D e métodos construtivos atuais) teria que ser adaptado ao outro. Após uma pesquisa mais alargada, descobriu-se novos materiais derivados do betão que mostram compatibilidade com as impressoras 3D já existentes. O desenvolvimento de novos materiais como os ECC (Engineered Cementitious Composites), mais conhecidos por betão flexível, criam a possibilidade de futuros edifícios não necessitarem de uma estrutura em aço. Infelizmente, esta pequena alteração não é suficiente para garantir a produção de edifícios através das tecnologias de Fabrico Aditivo, levando-nos a recorrer a softwares de análise de elementos finitos e estudos de formas geométricas para reforçar as falhas estruturais destes métodos. Questão na qual me debruço mais detalhadamente nesta parte da tese.

A informação presente neste capítulo seguinte, será apresentada sob forma de artigo, cujo resumo foi aprovado por de uma revisão peer-to-peer, no 3º Congresso Luso Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis em Fevereiro de 2018



**Fig.21:** Identificação das vigas de ECC na Torre Yokohama.



**Fig.22:** Substituição da junta de dilatação por trecho em ECC na ponte de Grove Street.

## 7.1 O Material

### 7.1.1 ECC

Engineered Cementitious Concrete é um tipo de betão com propriedades de resistência à tração, resultante da introdução de vários agregados. A fórmula deste tipo de materiais varia, mas geralmente, consiste na mistura de cimento, água, areias finas, cinzas provenientes de carvão e fibras de PVA (Polivinilalcol). Análises demonstraram que a introdução de uma pequena porção de fibras (cerca de 2%) eram o suficiente para podermos observar uma resistência de aproximadamente 3% a 5% na escala de ensaios à tração, comparado com os 0,01% apresentados pelo concreto comum.<sup>15</sup>

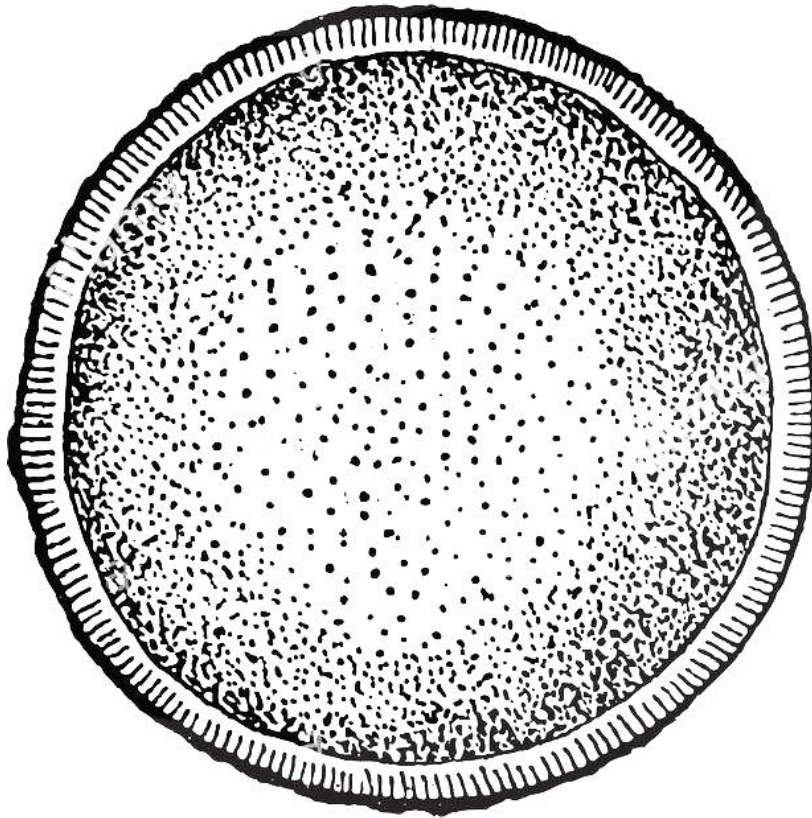
Atualmente, o uso dos ECC's ainda está relativamente restrito, maioritariamente devido ao seu custo de produção. Não obstante, tem vindo a ser aplicado em construções específicas, como a torre Nabeaure Yokohama (**Fig.21**), ou em reparações de estruturas como a ponte de Grove Street em Ypsilanti (**Fig.22**), Michigan, devido à sua reduzida necessidade de manutenção e propriedades de auto-reparação que acabam por justificar os custos a longo prazo. Testes demonstraram que os ECC's têm a capacidade de auto-repararem-se quando entram em contacto com água. Segundo análise de vários cientistas, este processo ocorre quando o material é exposto às condições climáticas comuns, nomeadamente a chuva e o sol. Foi observado que os ciclos húmidos e secos em contacto com os ECC's geravam uma substância denominada de Silicato Cálcio Hidratado que é essencialmente um tipo de massa cimentosa. Sofrendo das leis da gravidade, o Silicato Cálcio Hidratado vai escorrendo pelas fissuras, acabando por cobrir e curar as zonas danificadas da peça composta por ECC.<sup>16</sup>

Geralmente, a indústria construtiva foca-se na produção em massa, descartando produtos de elevados custos ou altamente especializados como é o caso dos ECC, custos estes que podem ser ligeiramente contidos através da introdução de maior ou menor quantidade de fibras PVA. No entanto, assim como os custos de produção, as propriedades de resistência à tração dos ECC's também se encontram diretamente ligados à quantidade de fibras administradas na mistura. Por esta razão, acha-se necessário proceder a cálculos para determinar

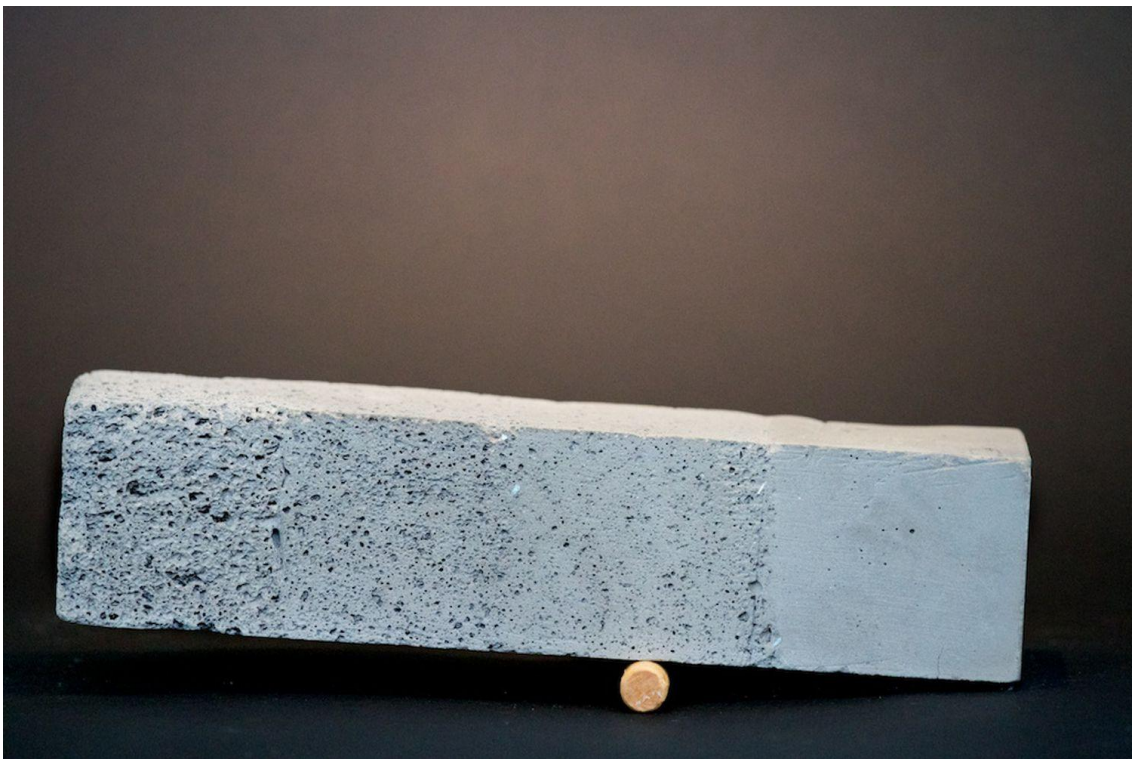
---

<sup>15</sup> Li V. C., Kanda T. (1998) Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. ASCE J. Materials in Civil Engineering, 10 (2), pp. 66-69.

<sup>16</sup> Kewalramani, M. A., Mohamed, O. A., & Syed, Z. I. (2017). *Engineered Cementitious Composites for Modern Civil Engineering Structures in Hot Arid Coastal Climatic Conditions*. International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016, 180(Supplement C), 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.237>



**Fig.23:** Secção do tronco de uma plameira.



**Fig.24:** Amostra exemplificativa dos testes executados pela Arquiteta Neri Oxman.

a percentagem de fibras necessárias por forma a obter-se um material eficiente ao menor preço. Medidas como a introdução de cinzas ou o uso de softwares de desenho paramétrico também provaram-se eficazes na redução dos custos de produção deste material, promovendo uma solução sustentável em alguns casos.

### **7.1.2 Functionally Graded Materials**

Functionally Graded Materials ou Variabilidade Material Estratificada é um conceito que pretende reforçar uma peça ou estrutura através de uma seleção estratégica e consolidação das zonas mais vulneráveis do objeto em questão. Inicialmente, este processo foi desenvolvido para aplicações aeroespaciais e automóvel, ultimamente tem vindo a expandir-se para áreas como o design e a Arquitetura, demonstrando os seus potenciais usos. A fusão deste método com o Fabrico Aditivo permite-nos criar estruturas mais resistentes e com menor massa, assim como secções de paredes com diferentes graus de rigidez e densidade material. Estes materiais funcionalmente graduados, geralmente, apresentam uma estrutura heterogénea e podem ser encontrados em abundância na natureza. Por exemplo, o tronco de uma palmeira (**Fig.23**) apresenta uma periferia com um grau de dureza relativamente elevado enquanto o seu núcleo aparenta ser muito mais macio. A grande variedade de características que estas matérias oferecem, tornam-nas extremamente versáteis e de grande valor para áreas como a Arquitetura. Estas características podem variar entre dureza, elasticidade, peso, entre outros e são atribuídas durante o seu processo de fabricação. Em contrapartida, materiais fabricados industrialmente tendem a apresentar uma volumetria homogénea, por forma a simplificar o processo de produção. Geralmente, as indústrias tendem a simplificar o processo de produção por forma a atingirem custos de produção menos elevados. No entanto, ao simplificarem o processo de produção, perde-se qualidades específicas que poderiam ser atribuídas a esses materiais durante a sua conceção. Os Materiais Funcionalmente Gradados são caracterizados pela variação gradual da sua composição e estrutura ao longo da totalidade do seu volume, resultando em alterações das propriedades do material. Esses materiais podem ser projetados para um conjunto específico de funções e aplicações, sendo um resultado direto das variações graduais que lhe são aplicadas.

Introduzindo a prototipagem rápida na fabricação sintetizada destes produtos promove-se melhorias no desempenho estrutural destes materiais, assim como a sua economia. No exemplo apresentado (**Fig.24**) pela Arquiteta/Designer Neri Oxman, podemos observar um bloco de cimento produzido através de métodos de Fabrico Aditivo e de Variabilidade Material Estratificada. Neste exemplo, a porosidade foi controlada pela proporção de alumínio na mistura, segundo os testes da autora, a porosidade máxima alcançada foi de 40% utilizando uma

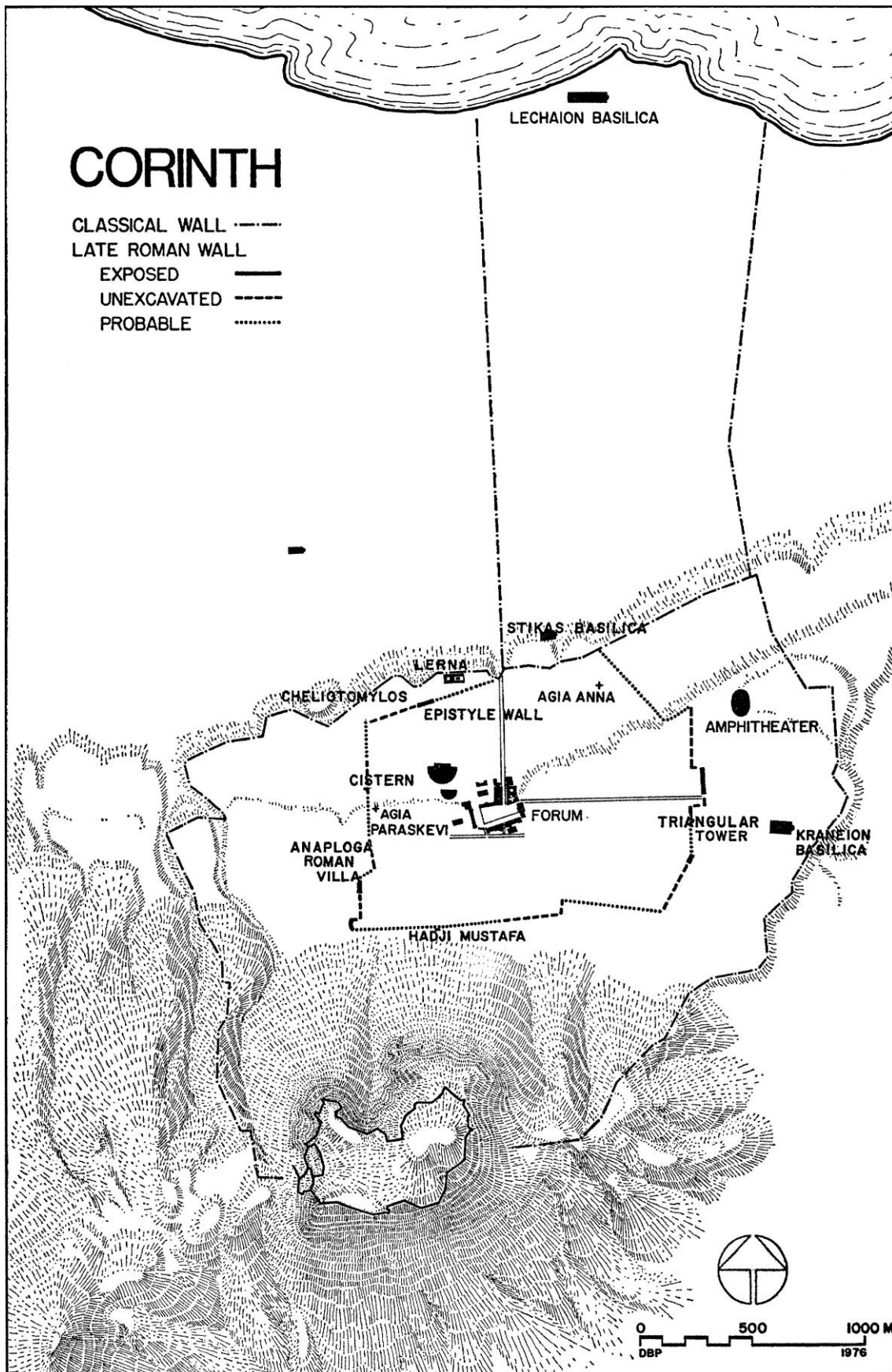


Fig.25: Muralha ornamentada com arcos entre Lechaio e Corinto.



proporção em peso de 1,2 g / kg de alumínio para mistura de cimento seco.<sup>17</sup> Usando cálculos, descobriu que a densidade de uma viga cilíndrica de betão podia ter 9% menos massa do que uma viga cilíndrica sólida com as mesmas dimensões e suportar a mesma carga sob um esforço de flexão.<sup>18</sup> Isto é conseguido, aumentando a densidade radial para definir uma resistência à tração igual ao esforço gerado pela carga exercida na viga. Cria-se assim um uso mais eficiente do material promovendo uma maior resistência das suas superfícies a impactos, danos/fraturas e reduzindo substancialmente o seu peso.

## 7.2 A Forma + O Software

Neste tópico, pretendo expor uma breve revisão sobre a história dos arcos desde as primeiras menções destes, até aos tempos modernos. Ao mostrar o desenvolvimento da forma dos arcos através da história, pretendo comprovar que os arcos não foram esquecidos e podem voltar a ser elementos essenciais para o futuro da Arquitetura.

Desde os primórdios da civilização, a história da Arquitetura tem-nos mostrado que os arcos foram um dos principais componentes estruturais na construção. Comprovaram ser de grande importância devido às suas características únicas, mais especificamente, do seu mecanismo à compressão e capacidade de cobrir longos vãos, suportando elevadas cargas. O uso mais notável dos arcos não ocorreu antes do final do século quarto antes de Cristo, na Macedónia e entre Lechaio e Corinto na Grécia atual.<sup>19</sup> No mapa apresentado (**Fig.25**), podemos observar a localização do que terá sido um dos primeiros usos dos arcos, tratava-se de uma muralha ornamentada com arcos que terá servido de estrutura defensiva de Corinto. Segundo estudos de Thomas D. Boyd, estes métodos construtivos ter-se-ão espalhado através de campanhas militares pela Grécia antiga, sendo depois continuado pelos Romanos. À medida que foram conquistando grande parte da Europa atual, descobriram que o arco era uma maneira eficiente de construir pontes, permitindo-lhes transportar recursos para os seus exércitos com maior facilidade. Apesar de serem guiados apenas por regras empíricas, pois não havia nenhuma

---

<sup>17</sup> Oxman, N., Keating, S., and Tsai, E., (2011) Functionally Graded Rapid Prototyping. Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 28 September - 1 October, 2011

<sup>18</sup> Oxman, N., Keating, S., and Tsai, E., (2011) Functionally Graded Rapid Prototyping. Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Leiria, Portugal, 28 September - 1 October, 2011

<sup>19</sup> Boyd, T. D. (1986). The arch and the vault in Greek architecture. University Microfilms.



Fig.26: Maqueta estereofunicular do Arquitecto Antoni Gaudí.

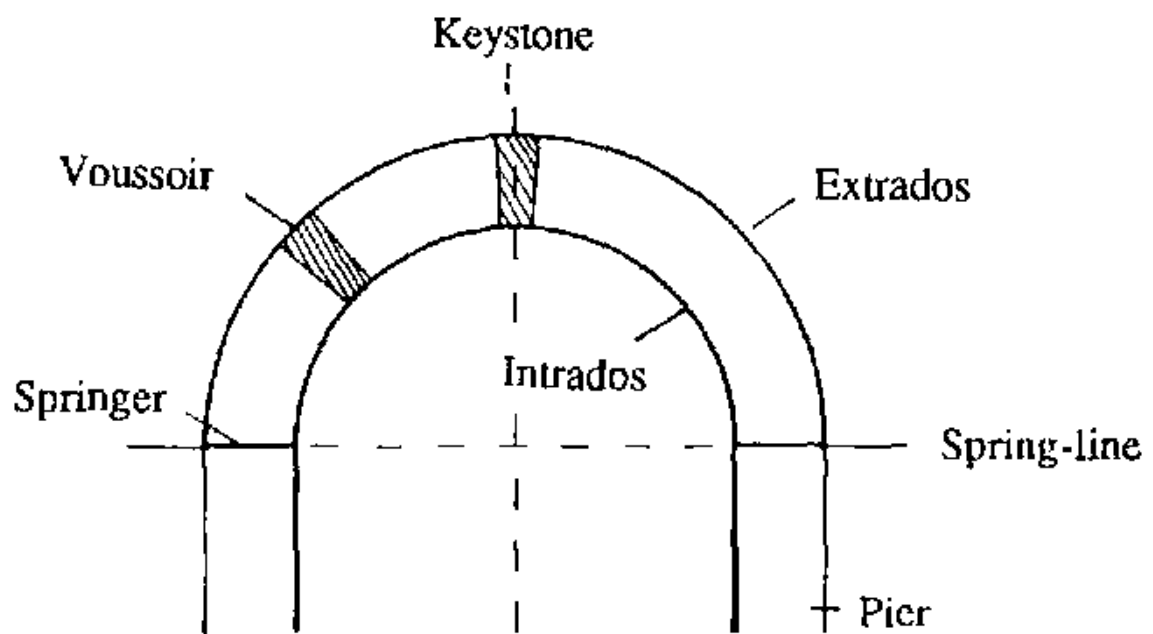


Fig.27: Exemplo de “intrados” e “extrados”.

teoria desenvolvida para determinar as dimensões seguras dos arcos,<sup>20</sup> os Romanos levaram a cabo outras experiências que permitiu-lhes construir estruturas como aquedutos, teatros e anfiteatros.

Num período seguinte, com a queda do Império Romano entramos na Idade Média, dando aparecimento de várias tipologias de arcos, inclusive os arcos em ogiva<sup>21</sup> que permitiram construir catedrais com suportes cada vez mais esbeltos e altos. Apesar do aparecimento do arco em ogiva, continuou-se a fazer uso dos outros arcos já existentes, continuando com essas técnicas construtivas até ao século XV. No século XV, inicia-se o período renascentista, época em que voltaram a pegar nos conhecimentos do clássico que tinham sido deixados no esquecimento durante a época medieval, dando-se um renascimento destes saberes perdidos. Iniciou-se um novo período de interesse pela arte e Arquitetura, levando ao desenvolvimento de novos estudos sobre a estática e teoria dos arcos, que serviriam de base para a construção até ao século XIX.

Um dos últimos Arquitetos do século XIX a fazer grande uso dos arcos foi o arquiteto Catalão Antoni Gaudí. Os seus estudos das Catenárias são bastante conhecidos devido à sua abordagem original (**Fig.26**) e engenhosa, que levou-o a destacar-se como uma mente da Arquitetura espanhola.

As Catenárias foram introduzidas por volta de 1675 pelo cientista Robert Hooke, afirmando serem a forma correta do uso dos arcos e fazendo a primeira referência à analogia dos cabos pendurados.<sup>22</sup> Esta teoria foi sendo analisada com o passar dos anos, acabando por ser retomada por Gaudí, que chegou por levar ao seu potencial máximo. O conceito de Gaudí não se focava em verificar a estabilidade de uma estrutura, mas em projetar uma estrutura com formas estáveis, integrando o desenho estrutural com o projeto. A dificuldade desta teoria não estava em encontrar uma Catenária que suportasse o seu peso próprio, mas encontrar a deformação certa de uma Catenária para que esta pudesse suportar uma carga específica. Geralmente, o fator que definia a carga suportada por uma Catenária, para além da sua geometria, era a distância entre o “intrados” e o “extrados” (**Fig.27**).<sup>23</sup> Este processo envolvia cálculos de alguma

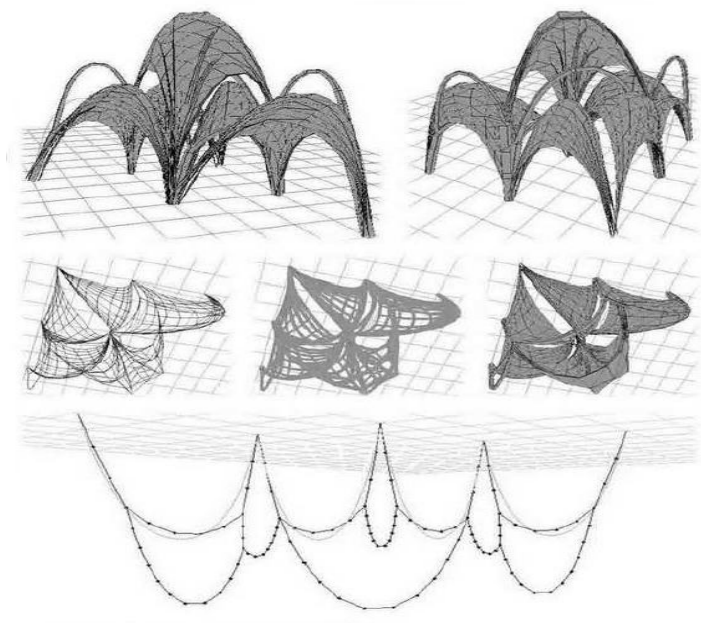
---

<sup>20</sup> Acocella, A. (2004). *L'architettura di pietra. Antichi e nuovi magisteri costruttivi*. Firenze, Lucense-Alinea. Pag. 308-335

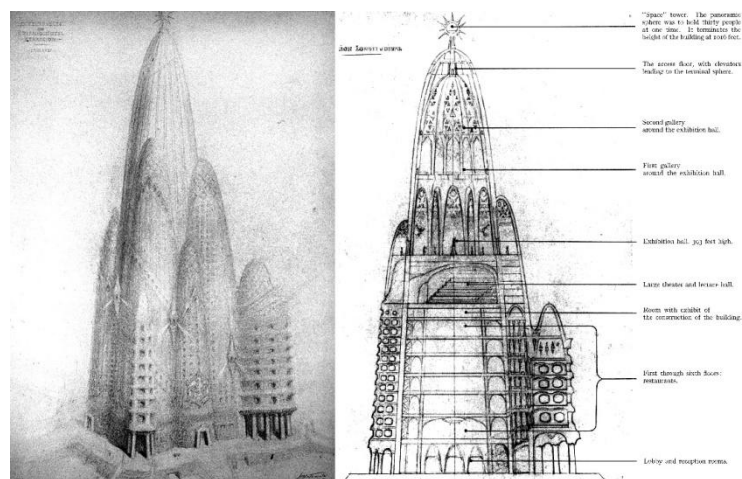
<sup>21</sup> Idem, *Ibidem*. Pag. 349-351

<sup>22</sup> Huerta, S. (2006). *Structural Design in the Work of Gaudí*. *Architectural Science Review*, 49(4), 324–339. <https://doi.org/10.3763/asre.2006.4943>

<sup>23</sup> Block, P., DeJong, M., & Ochsendorf, J. (2006). *As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches*. *Nexus Network Journal*, 8(2), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9>



**Fig.28:** Modelo das Catenárias de Gaudi desenhado por Prof. Dr. Mauro Costa Couceiro.



**Fig.29:** Desenhos do Hotel Attraction de Gaudi.



**Fig.30:** Estrutura montada a base de sacos de areia do Superadobe.

complexidade e era considerado extremamente demorado, tornando a tarefa de projetar extremamente complexa. Gaudi precisava de uma ferramenta que lhe permitisse determinar as cargas das Catenárias de forma rápida para poder prosseguir a alterações no projeto com facilidade. A sua técnica consistia em primeiro pendurar um cabo pelas suas extremidades e calcular o seu peso e distancia ao chão, de seguida adicionava pesos consoante as cargas definidas, levando à deformação da Catenária e adotando a forma adequada à carga.

No fundo, trata-se de um jogo de equilíbrios, o cabo suspenso que trabalha à tração torna-se a Catenária que funciona à compressão, sendo sempre o oposto um do outro. Gaudi tinha-se tornado mestre neste conceito, o que lhe permitiu projetar edifícios de uma grande complexidade usando somente formas à compressão (**Fig.28**) e (**Fig.29**).

Depois, com o passar das décadas e o aparecimento de novas técnicas e materiais, foi-se perdendo o interesse e uso do arco como forma estrutural. Prosseguindo estudos por outras vias, diferentes dos arcos, acabamos por chegar aos métodos construtivos de hoje, deixando os arcos no passado. Hoje em dia, fazendo uso de métodos digitais é possível medir e alterar a geometria de modelos, antevendo os resultados sem perder no tempo de montagem requerido pelas maquetes físicas. Fazendo uso de softwares é possível elaborar mais testes e em menos tempo, permitindo fazer alterações com mais facilidade, questão que se tornava difícil com maquetes.<sup>24</sup> Outra vantagem presente no uso dos métodos digitais é a possibilidade de modelar um objeto e só posteriormente aplicar as leis da gravidade, por forma a observar as reações que poderão alterar a sua estrutura.<sup>25</sup>

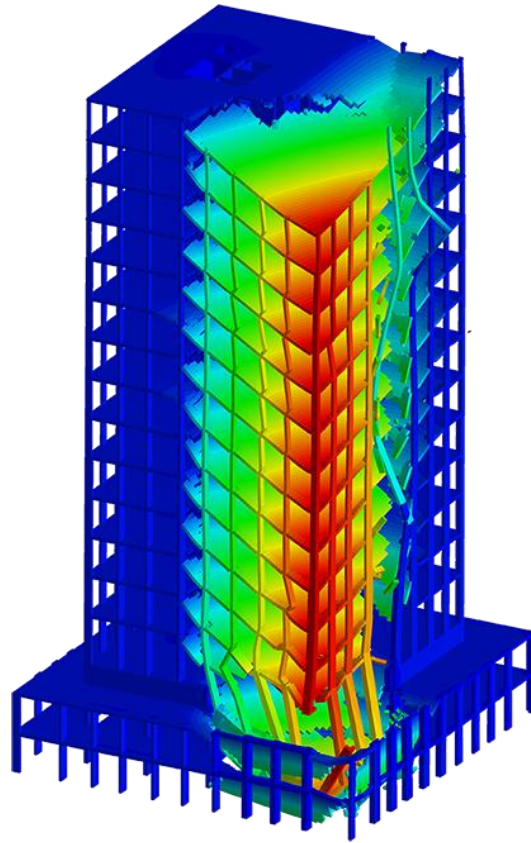
Outro tipo de estrutura atual que funciona somente à compressão é o exemplo do Superadobe (**Fig.30**). Este sistema, inventado pelo Arquiteto Nader Khalili, consiste em utilizar sacos de areia para formar uma estrutura e posteriormente revesti-la com cal ou cimento. A utilização de formas que funcionam à compressão garante um funcionamento estável e seguro destas estruturas. O Superadobe foi inicialmente apresentado à NASA para o programa de habitação lunar e nomeado para o prémio de Arquitetura Aga Khan em 2004.<sup>26</sup>

---

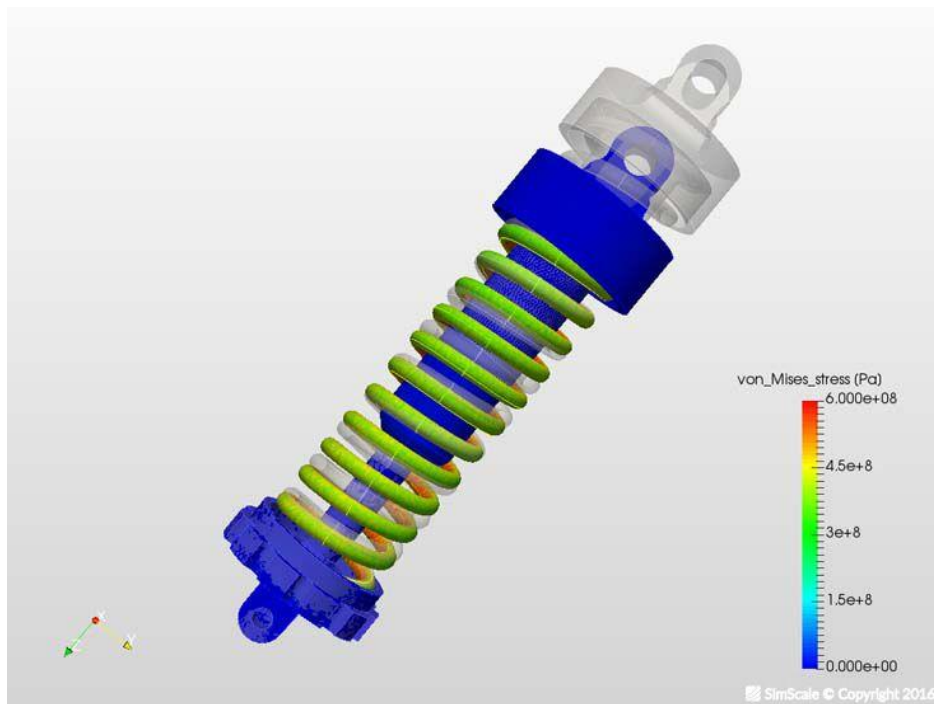
<sup>24</sup> Kilian, A. (2004). *“Linking Hanging Chain Models to Fabrication”* Axel Kilian, MIT

<sup>25</sup> Idem, Ibidem.

<sup>26</sup> Site Oficial da CalEarth. Retrieved 2017, December 20 from <http://www.calearth.org/intro-superadobe/>



**Fig.31:** Colapso de uma estrutura, determinado por Software FEA.



**Fig.32:** Análise FEA a cores.

Atualmente, recorre-se à análise de elementos finitos (**Fig.31**), que é uma ferramenta\software utilizada para simular comportamentos físicos de um ou vários materiais, através de um computador. É utilizada para entender as reações de um objeto face a forças que lhe são aplicadas, assim como os seus critérios de falha ou rutura, fornecendo respostas precisas. Em vez de construir um protótipo e desenvolver testes elaborados para analisar o comportamento físico de um produto, os engenheiros recorrem a este tipo de softwares para obterem informações de forma rápida e precisa. A utilização da análise de elementos finitos pode minimizar ou mesmo eliminar a necessidade de prototipagem física e de testes. Esta tecnologia tornou-se extremamente presente em vários campos da engenharia demarcando-se no mundo da fabricação como uma valiosa ferramenta de desenvolvimento de produtos. O processo de análise de elementos finitos consiste em subdividir um sistema em componentes individuais e analisar o seu comportamento como um objeto e cada um dos elementos entre si. Esta é uma das formas mais precisas de realizar análises na área da engenharia e até mesmo em outros campos analíticos. Por exemplo, a suspensão de um carro é vista como uma peça só mas na realidade, trata-se de um conjunto de componentes.

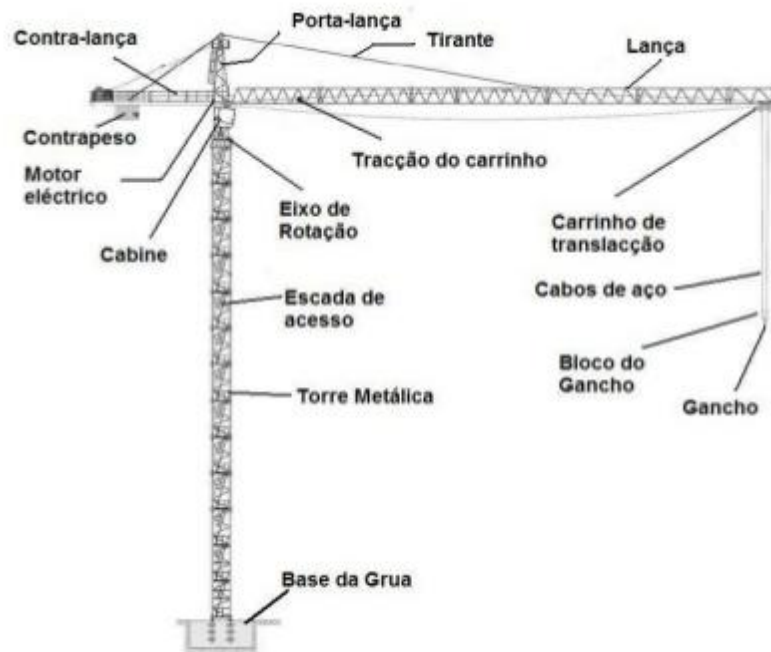
Através da análise, é possível determinar o funcionamento da suspensão como uma peça só, assim como o funcionamento de cada uma das peças. Determinando assim, os pontos vulneráveis de cada um dos elementos que constituem suspensão. Geralmente, o software exhibe os resultados através de modelos 3D codificados por cores, vermelho geralmente assinalando uma área de falha e azul nas áreas que mantêm sua integridade sob carga aplicada. (**Fig.32**)

Os engenheiros usam este tipo de análise para quase todo tipo de desenvolvimento de produtos e estudo de esforços imagináveis. A análise projetos de maquinaria, plásticos moldados por injeção, sistemas de refrigeração e cálculos estruturais de edifícios são apenas alguns exemplos de como as empresas utilizam a análise de elementos finitos.

Este tópico pretende assim fazer uma junção de tecnologias emergentes e saberes para permitir a criação de formas estruturalmente seguras à compressão, sendo que os arcos já revelaram serem uma estrutura estável, seja através das obras de Gaudí ou das estruturas ainda eretas que datam dos períodos Romano, Medieval e Renascentista. Com intuito de desenvolver uma potencial ferramenta de construção edificatória por forma a reforçar falhas estruturais dos métodos de Fabrico Aditivo, recorrendo a softwares de análise de elementos finitos, a estudos de formas geométricas e analisando conhecimentos estruturais dos séculos passados.



**Fig.33:** Render do esboço/protótipo.



**Fig.34:** Componentes de uma grua.



### 7.3 O Hardware

Neste tópico, pretende-se criar um esboço\protótipo (**Fig.33**) da parte física da grua\impressora 3D, baseando-me na forma de uma grua industrial. Como podemos ver na (**Fig.34**), estas são umas das componentes base para o funcionamento de uma grua. Após uma análise, verificou-se que para melhor desenvolvimento do seguinte projeto seria necessário fazer alterações na estrutura da grua, assim como, algumas das suas componentes.

Após uma análise, englobando vários tipos de impressoras 3D e equipamentos técnicos relacionados com estas tecnologias de Fabrico Aditivo, chegou-se a uma lista aproximada de componentes necessárias para a criação da grua\impressora 3D.

#### 7.3.1 Estrutura

Como sabemos, as impressoras 3D têm a capacidade de se movimentarem nos 3 eixos axiais (X, Y e Z) devido a 3 motores. Na maioria dos casos, o mesmo acontece com as gruas, fazendo uso dos seus motores por forma a deslocarem as cargas nos campos de obras. Uma das particularidades das impressoras 3D é a necessidade de escolher os motores conforme o peso do cabeçote por forma a poder movimentar-se com facilidade e precisão. No caso deste protótipo, essa questão torna-se irrelevante visto as gruas estarem equipadas com motores preparados para suportar cargas elevadas, não existindo o risco de sobrecarga. Tendo em conta que alteramos função principal da grua por outra não relacionada com a elevação de cargas, supõe-se que parte, se não a totalidade dos contrapesos situados na contra-lança sejam desnecessários, podendo esse espaço ser ocupado com componentes necessárias ao protótipo.

Outra questão pertinente que surgiu na minha análise foi a aplicação do cabeçote à grua. Verificou-se que a utilização do gancho de carga e dos cabos de aço que o suportam seria inadequado para o funcionamento da impressora. O gancho e os cabos estariam constantemente em oscilação devido a forças exercidas pelo vento, tal pode ser observado na utilização normal de uma grua. Foi ponderada a utilização de um sensor para compensar as ações do vento, mas após alguma reflexão, cheguei à conclusão que o movimento rotativo da grua seria suficiente para afetar a trajetória da extrusão do material. Observando exemplos de outras impressoras surgiu um modelo com um braço telescópico que me pareceu ser uma solução apropriada para este protótipo.



**Fig.35:** Sistema telescópico da impressora APIS2000F.



**Fig.36:** Componentes de uma grua.

A impressora APIS2000F (**Fig.35**), usa um sistema telescópico na parte estruturante da lança. Visto as gruas já terem um sistema de carrinhos adequado na lança seria desnecessário substituí-lo. No entanto, é essencial substituir o gancho e os cabos que o suportam, por um sistema telescópico que suporte o cabeçote de impressão, garantindo assim uma impressão precisa. A extensão do sistema telescópico teria que ser da mesma medida que as peças que compõe a torre por forma a não haver falhas verticais na impressão. Por exemplo, suponhamos que cada peça constituinte da torre tem 3 metros, o sistema telescópico teria que garantir que o cabeçote conseguisse imprimir na totalidade desses 3 metros. Cada peça aplicada na torre permitiria a impressão de mais 3 metros em altura ou o equivalente de mais um andar, podendo este processo ser repetido até atingir-se a altura total do edifício.

### **7.3.2 Extrusor**

O extrusor é a componente que mais varia conforme a impressora, na maioria dos casos, será uma peça customizada ou adaptada de outro tipo de maquinaria. Neste caso, decidi escolher o sistema utilizado pelas máquinas de enchimento industriais por serem ferramentas de alta precisão, permitindo a produção de materiais funcionalmente graduados. Uma opção que me pareceu de interesse foi a aplicação de máquinas resistentes à corrosão visto este projeto fazer uso de ECC's que contêm resinas e materiais corrosivos. Uma das vantagens destas máquinas como o modelo FIL-PMP-POR (**Fig.36**) é serem produzidas para processarem substâncias viscosas e partículas, que é o caso dos ECC's, por conterem vários tipos de agregados.

### **7.3.3 Energia**

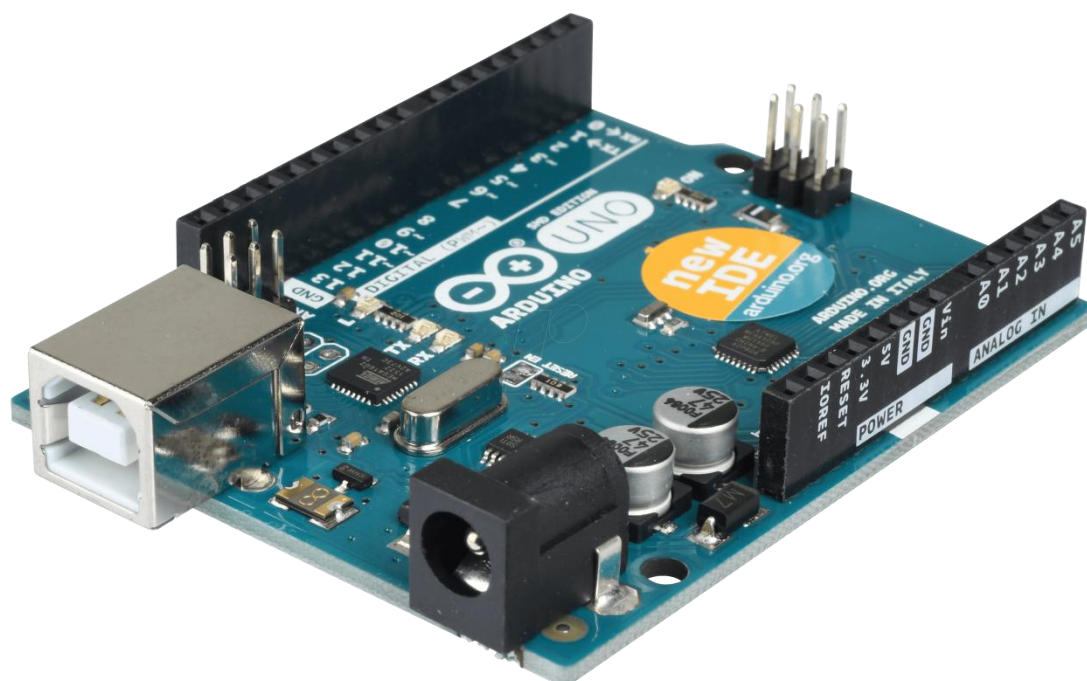
Continuando com grande parte da estrutura de uma grua, acredita-se que a fonte de alimentação possa ser a mesma, podendo haver algumas alterações devido a introdução de novos equipamentos relacionados com impressoras 3D. Geralmente, os KVA (quilovolt amperes) necessários para uma grua variam consoante o tamanho e tipo do equipamento, tornando-se impossível determinar o valor exato necessário para este protótipo.

### **7.3.4 Recipiente\Conector**

Grande parte das componentes utilizadas neste projeto são comuns na área da construção, acontecendo o mesmo com o recipiente e conector. Para o recipiente, decidi não escolher um exemplo específico pois qualquer betoneira misturadora é adequada, desde que seja



**Fig.37:** Bomba de betão C50SS.



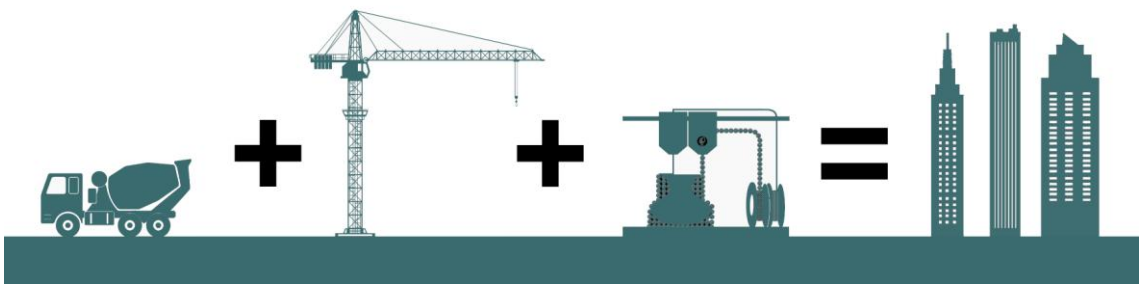
**Fig.38:** Controlador de movimentos Arduino Uno.

transportável. A escolha poderá variar entre silo ou camião betoneira, dependendo da capacidade do recipiente e dos acessos ao local de obra.

Em relação ao conetor, optei por uma bomba de betão, pois é necessário o equipamento ter força suficiente para bombear a mistura até ao topo da grua/impressora. O modelo C50SS (Fig.37) aparentou ter as características indicadas devido à capacidade de atingir altas pressões (2000 psi) e ao facto de ser móvel. Outras opções que pareceram ser de interesse nesta bomba foram a possibilidade de escolher a velocidade de bombeamento e o controlo remoto que permitiriam sincronizar com os movimentos da grua e extrusor através do controlador.

### **7.3.5 Controlador**

Nos exemplos que pude observar, os movimentos e ações das impressoras 3D eram processados por um controlador de movimentos (Fig.38). Após analisar vários modelos de controladores, vim a descobrir que eram indicados para alimentar motores de passo, existindo uma possibilidade de serem incompatíveis com os motores hidráulicos das gruas. No entanto e apesar de nunca ter sido testado, surgiu a ideia de que o controlador pudesse ser conectado aos comandos de controlo remoto da grua, agindo como um tipo de Plug in e automatizando dessa forma a grua/impressora.



**Fig.39:** Logotipo da impressora/grua.

## 8 Reflexões Finais

Considerando todos os dados expostos anteriormente e analisando bem as problemáticas em questão podemos concluir que o Fabrico Aditivo encontra-se num estado muito embrionário para poder ser considerado uma solução viável na Arquitetura. Apesar de já existirem alguns exemplos de pequenos empreendimentos, como expus nesta dissertação, ainda estamos longe de imprimir edifícios na sua totalidade. Os sistemas estruturantes dos edifícios impressos encontram-se num estado muito rudimentar, exigindo estudos adicionais por forma a permitir a construção de vários andares numa só impressão. Outra questão é que embora os aditivos à base de pó e a impressão 3D de resina estejam num estado avançado na indústria de fabricação, o avanço dos materiais para a construção ainda se encontram numa fase inicial.<sup>27</sup>

Independentemente dos fatores acima referidos, a impressão 3D e a robótica requerem uma geração de Arquitetos e Engenheiros de Robótica, que só nestas últimas décadas tem vindo a ser formados, especializados em programação de softwares nas quais a impressão 3D reside, para tornar esta questão uma realidade. A presença de pequenas construções e potenciais exemplos executados com estas técnicas, indicam que estes métodos terão um lugar no nosso futuro.

Relativamente aos materiais, nomeadamente os ECC's, o aumento do seu uso indica que estes materiais têm um futuro na construção e potencial para se tornar um material standard, podendo vir a substituir o betão e aço que usamos atualmente. Testes adicionais poderão levar a descobrir formas de reduzir os custos destes materiais, quer sendo através da introdução de agregados, no caso da introdução de cinzas ou através do Fabrico Aditivo. FGM's por sua vez, poderão inspirar uma nova era de Arquitetura e Design orientado para o biomimetismo quer seja através de métodos tradicionais ou modernos, levando a uma otimização de materiais e promovendo novas aplicações destes mesmos.

Com o auxílio de softwares de Análise de Elementos Finitos, que garantem uma segurança essencial para a construção de edifícios, torna-se relativamente fácil analisar as catenárias utilizadas pelo Gaudi. Esta forma à compressão que provou ter sido estruturalmente estável no passado, pode ser um dos únicos métodos viáveis de aplicação do Fabrico Aditivo na nossa atualidade.

---

<sup>27</sup> Balch O. (2017, Janeiro 31) Building by numbers: how 3D printing is shaking up the construction industry. Retrieved from <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/jan/31/building-by-numbers-how-3d-printing-is-shaking-up-the-construction-industry>





Por fim, em relação ao protótipo, é necessário proceder a análises adicionais, possivelmente numa futura investigação e com auxílio de uma entidade especializada poder-se-á desenvolver uma ferramenta viável para a construção.



## 9 Bibliografia

### Artigos

Bagi K. (2014, April) *When Heyman's Safe Theorem of rigid block systems fails: Non-Heymanian collapse modes of masonry structures*. *International Journal of Solids and Structures* 51, pp. 2696–2705

Balch O. (2017, Janeiro 31) *Building by numbers: how 3D printing is shaking up the construction industry*. Retrieved from <https://www.theguardian.com/sustainable-business/2017/jan/31/building-by-numbers-how-3d-printing-is-shaking-up-the-construction-industry>

Bedi R., Chandra R., Singh S.P. (2013) *Mechanical Properties of Polymer Concrete*. *Hindawi Publishing Corporation Journal of Composites*  
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/948745>

Block, P., DeJong, M., & Ochsendorf, J. (2006). As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches. *Nexus Network Journal*, 8(2), 13–24. <https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9>

Boughanem, S., Jesson, D., P.A.Smith, Mulheron, M., Eddie, C., Psomas, S., & M.Rimes. (2011). *ENGINEERED CEMENT COMPOSITES PROPERTIES FOR CIVIL ENGINEERING APPLICATIONS*. 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS  
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3673.0729>

Boyd, T. D. (1986). *The arch and the vault in Greek architecture*. University Microfilms.

Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G. F., and Thorpe, A. (2007, March). Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction. *Journal of Automation in Construction*, 16(2), pp.224–231.

Carvalho, P., Nunes, S., & Sousa, J. (2014). *Elementos compósitos em betão com geometria complexa por processos de fabrico automatizado*. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas.

Carvalho, P., Paulo Fonseca de Campos, Nunes, S., & Sousa, J. (2015). *Expanding the material possibilities of lightweight prefabrication in concrete through robotic hot-wire cutting - form,*



*texture and composition*. eCAADe 2015 - Real Time. Extending the Reach of Computation. (pp. 341-351).

Fukuyama, H., Matsuzaki, Y., Nakano, K. and Sato, Y. (1999), "Structural Performance of Beam Elements with PVA-ECC", *Proceedings of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 3*

(*HPFRCC 3*), Ed. H.W. Reinhardt and A. Naaman, RILEM Publications S.A.R.L., PRO 6, pp 531-541.

Gregory, T. E. (1979). The Late Roman Wall at Corinth. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens*, 48(3), 264–280. <https://doi.org/10.2307/147980>

Gross, B-C. Erkal, J-L. Lockwood, S-Y. Chen, C. Spence, D-M. (2014, January 16). Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences. *Analytical Chemistry*, 86 (7), pp. 3240–3253.

Hackney, Philip (2007) An investigation into the characteristics of materials and processes, for the production of accurate direct parts and tools using 3D rapid prototyping technologies. Doctoral thesis, Northumbria University. This version was downloaded from Northumbria Research Link: <http://nrl.northumbria.ac.uk/982/>

Heiskanen A. (2015, Junho 24) A Finnish Startup Takes 3D Printing of Buildings to a New Level. Retrieved from <https://aec-business.com/a-finnish-startup-takes-3d-printing-of-buildings-to-a-new-level/>

Howe, A-S. Wilcox, B. McQuin, C. Mittman, D. Townsend, J. Polit-Casillas, R. Litwin, T. (2014, October). *Modular Additive Construction Using Native Materials*. ASCE's Aerospace Division 14th Earth and Space Conference October, 2014 - St. Louis, Missouri, USA.

Huerta S. (2006) *Structural Design in the Work of Gaudi*. Architectural Science Review Volume 49.4, pp 324-339.

*Innovative technologies for buildings: EU funded research to transform the construction sector*. (2009) Prepared by Directorate - General for Research, Industrial technologies, Unit G2 'New



generation of products'. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.

Joshi V.P., Dhawale A. W. (2013) Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. *International Journal of Application or Innovation in Engineering and Management* 2 (4).

Kewalramani, M. A., Mohamed, O. A., & Syed, Z. I. (2017). *Engineered Cementitious Composites for Modern Civil Engineering Structures in Hot Arid Coastal Climatic Conditions*. *International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016, 180(Supplement C), 767–774*. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.237>

Khoshnevis, B. (2004, January). Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. *Journal of Automation in Construction – Special Issue: The best of ISARC 2002, 13(1), pp. 5-19*.

Khoshnevis, B. (2004, August). Houses of the Future: Construction by Contour Crafting Building Houses for Everyone. *Urban Initiative Policy Brief*.

Kilian, A. (2004). *“Linking Hanging Chain Models to Fabrication ” Axel Kilian, MIT*

Kumar P. G., Kumar S. K. (2015) STUDIES ON STRENGTH CHARACTERISTICS OF FIBRE REINFORCED CONCRETE WITH WOOD WASTE ASH. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)* pp. 2395 -0056 02 (09).

Li V. C., (2003, November) On Engineered Cementitious Composites (ECC). A Review of the Material and Its Applications. *Journal of Advanced Concrete Technology* 1 (3), pp-215-230.

Li V. C., Kanda T. (1998) Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. *ASCE J. Materials in Civil Engineering*, 10 (2), pp. 66-69.

Lipson, H. (2012, Spring) *Frontiers in Additive Manufacturing: The Shape of Things to Come. The Bridge, 42(1), pp. 5-12*.





Mahamood, R.M., Akinlabi, E.T., Shukla M., Pityana, S. (2012) Functionally graded material: An overview. In: Proceedings of the world congress on engineering WCE 2012, vol. 3, pp. Martins P. F., Sousa J. P. (2014) Digital fabrication technology in Concrete Architecture. in Thompson, Emine Mine (ed.), Fusion – Proceedings of the 32nd eCAADe Conference – Vol.1 pp. 475-484

Oxman, N., Keating, S., and Tsai, E., (2011) *Functionally Graded Rapid Prototyping. Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping: Proceedings of the 5th International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 28 September - 1 October, 2011

Rissanen V. (2017, Mai 5). Finnish Fimatec Oy Launches the World's Largest 3D Printer Suitable for Construction Industry production. Helsingin Sanomat Press Release (English Version). Retrieved from <http://fimatec.fi/wp-content/uploads/2017/05/PressRelease170505.pdf>

Sousa, J. (2012). *Material Customization: Digital Fabrication Workshop at ISCTE/IUL*. Nexus Network Journal. 14 (3), 573-578.

Wang S., Li V.C. (2007, May-June) Engineered cementitious composites with high-volume fly ash. *ACI Materials Journal*, 104 (3).

Wang, Y. Leu, M-C. (2014, March). *Frontiers of Additive Manufacturing, Research and Education*. An NSF Additive Manufacturing Workshop Report. Gainesville: University of Florida, Center of Manufacturing Research.

Wohlers, T., Gornet, T. (2014). *History of additive manufacturing*. Wohlers Report 2014, Fort Collins, Colorado, USA.

## **Livros**

Acocella, A. (2004). *L'architettura di pietra. Antichi e nuovi magisteri costruttivi*. Firenze, Lucense- Alinea.

Bastos, V. F. (2014), *Moda E Fabricação Digital Em Um Contexto Fab Lab: Equipamentos, Métodos e Processos Para O Desenvolvimento De Produtos De Moda*. Programa De Pós-Graduação Em Design, Universidade Federal De Pernambuco.



Cockburn, M. (2014), *A Printed World: The Possibilities Of 3D Printing In Architecture*. Department Of Architecture, University Of Strathclyde.

Costa Couceiro, M. (2009, Janeiro 16). *Analogías biológicas en la arquitectura - del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital* (Ph.D. Thesis). Universitat Internacional de Catalunya. Obtido de <http://www.tdx.cat/handle/10803/9329>

Davison N. (2016, November 31) 3D-printed cities: is this the future? Retrieved from <https://www.theguardian.com/cities/2015/feb/26/3d-printed-cities-future-housing-architecture>

Dolhan, V. (2013) *3D Printing in Architecture: A Current State of the Industry with Past and Future Perspectives*. Business School of Architectural Technology and Construction Management, Horsens: VIA University College.

Gibson, I. Rosen, W-D. Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer-Verlag.

Jones, J. B. (2013), *Investigation Of Laser Printing For 3D Printing And Additive Manufacturing*. Warwick Manufacturing Group, University Of Warwick.

Kempton, W. (2013), *3D Printing Unlimited: Is The 3D Printer Our Next Home Appliance?* Oslo School Of Architecture and Design.

Kurrer K-E., (2008), *The History of the Theory of Structures*. From Arch Analysis to Computational Mechanics, Berlin: Ernst. & Sohn.

Kwon, H. (2002) *Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process Using Uncured Ceramic Materials*. Faculty of the Graduate School, Los Angeles: University of Southern California.

Lauer S., (2015) *Buildings As An Assembly Of 3D Printed Components*, Department Of Architecture, Southern Illinois University.

Lin, Ed. Sc, (2016) *Print Your Future Home, The Future Of 3D Printing*, Academy of Art University, San Francisco.

Lopes, G. T. F. (2016), *Exploração Das Possibilidades Da Impressão 3D Na Construção*. Faculdade De Engenharia, Universidade Do Porto.

Moreira, R. A. S. (2013), *Novas Possibilidades Na Arquitetura, Reação, Interação, Inteligência*, Faculdade De Arquitetura, Universidade Do Porto.



Mota, V. L. P. (2012) , *Fabs Labs e Inovação: Contributo das Boas Praticas de Casos Holandeses*. Faculdade de Economia, Universidade Do Porto.

Potra, M. D. (2013), *3D Printing In Architecture: Experimenting In The Desert*. School of Architecture and Society, Politecnico Di Milano.

Sköld, G., Vidarsson, H. (2015) *Analyzing the Potentials of 3DPrinting in the Construction Industry: Considering implementation characteristics and supplier relationship interfaces*. Department of Technology Management and Economics, Division of Industrial Marketing, Gothenburg: Chalmers University of Technology.

Sepúlveda, J. M. (2012) *Bio-inspiração aplicada a estruturas de betão: desafios e possibilidades associadas às técnicas de impressão 3D*. Escola de Engenharia, Universidade do Minho.

Van der Veen, A-C. (2014). *The Structural Feasibility of 3D-printing houses using printable polymers*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology.

Van Wijk, A. Van Wijk, I. (2015). *3D Printing with Biomaterials: Towards a Sustainable and Circular Economy*. Delft University Press.

## **Sites**

Blog Oficial do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. Retrieved 2016, December 12 from <http://www.iaacblog.com/programs/stone-spray/>

Site Oficial da Apis Cor. Retrieved 2017, August 15 from <http://apis-cor.com/en/faq/texnologiya-stroitelstva/>

Site Oficial da Contour Crafting. Retrieved 2017, February 17 from <http://contourcrafting.com/building-construction/>

Site Oficial do Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. Retrieved 2017, August 15 from <https://iaac.net/>

Site Oficial da Skidmore, Owings & Merrill LLP. Retrieved 2017, February 15 from <http://www.multivu.com/players/English/7634251-skidmore-owings-merrill-3d-printed-building/>

Site Oficial da CalEarth. Retrieved 2017, December 20 from <http://www.calearth.org/intro-superadobe/>



## Videos

Finnish Intelligent Module Apartments. (2017, Mai 5). The RoboCatt Printer [video]. Retrieved from [https://www.youtube.com/watch?v=f\\_5TcUB8Sto](https://www.youtube.com/watch?v=f_5TcUB8Sto)

Mataerial. (2017, January 25). Mataerial in action [video]. Retrieved from <http://www.mataerial.com/#3rdPage>

Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha. (2017, January 25). Minibuilders [video]. Retrieved from <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/minibuilders/>

## 10 Fontes de Imagens

**Fig.1:** Asa de um Boeing 777X a ser impressa pela Oak Ridge National Laboratory. Retrieved from <http://static4.businessinsider.com/image/58a4c2c9549057bc008b4cbb/watch-the-government-create-the-worlds-largest-3d-printed-object-in-under-one-minute.jpg>

**Fig.2:** Veículo elétrico “Strati” criado pela empresa Local Motors. Retrieved from <https://s3.amazonaws.com/digitaltrends-uploads-prod/2014/09/Local-Motors-Strati-001.jpg>

**Fig.3:** Exemplo da técnica utilizada pelos Food Ink. Retrieved from <http://images4.newscred.com/cD1kY2I2YTU2NjU3MGQ4OTdjMGQ2ODgyMWUyMjY3ZjAzMCZnPTewOGQ0NjhNNDkwMzhjNTU5OTI1MjNlMDQ4ZDcwZTQ3>

**Fig.4:** Secção de um edifício a ser impressa no armazém da Winsun. Retrieved from <http://assets.inhabitat.com/wp-content/blogs.dir/1/files/2015/01/Winsun-3dprint-mansion4.jpg>

**Fig.5:** Markus Kayser e a sua impressora solar (Solar Sintering). Retrieved from <http://www.21stcentech.com/wp-content/uploads/2013/04/Solarsinter.jpg>

**Fig.6:** A Solar Sintering durante o processo de impressão de um objeto. Retrieved from <http://mhellar.github.io/physcomp16/img/ss1.png>

**Fig.7:** Impressora 3D Stone Spray. Retrieved from [https://i.vimeocdn.com/video/332798682\\_1280x720.jpg](https://i.vimeocdn.com/video/332798682_1280x720.jpg)





**Fig.8:** Edifício impresso e montado pela companhia Winsun. Retrieved from <http://i.huffpost.com/gen/2511430/images/o-3D-PRINTED-FLATS-MANSION-HOUSE-VILLA-APARTMENT-facebook.jpg>

**Fig.9:** Enrico Dini e a sua impressora D Shape. Retrieved from <https://i.ytimg.com/vi/WLSX9kI9szc/maxresdefault.jpg>

**Fig.10:** Objeto impresso pela D Shape, Enrico Dini e um colaborador. Retrieved from [https://lsn-staging.s3.wefew.io/201003%2F1687%2Fimage%2FRadiolaria\\_by\\_Andrea\\_Morgante\\_8.jpg?width=960&height=540&quality=80&crop=0&method=ratio](https://lsn-staging.s3.wefew.io/201003%2F1687%2Fimage%2FRadiolaria_by_Andrea_Morgante_8.jpg?width=960&height=540&quality=80&crop=0&method=ratio)

**Fig.11:** Impressora da Apis Cor em processo de impressão. Retrieved from <http://static6.businessinsider.com/image/58d3fba6d349f9cb778b5cc3-1568/apiscorfebr02.jpg>

**Fig.12:** Pormenor da forma da parede e peças estruturais. Retrieved from <http://static4.businessinsider.com/image/58d3fbc0d349f965008b6710-1743/apiscorfebr05.jpg>

**Fig.13:** Behrokh Khoshnevis inventor da impressora Contour Crafting. Retrieved from [https://all3dp.com/app/uploads/2016/07/web\\_Khoshnevis2.jpg](https://all3dp.com/app/uploads/2016/07/web_Khoshnevis2.jpg)

**Fig.14:** Impressora Contour Crafting no processo de impressao. Retrieved from <https://zbrella.com/wp-content/uploads/2017/03/ContourCrafting2.jpg>

**Fig.15:** Edifício e veículo desenvolvido e impresso pela SOM e ORNL. Retrieved from <http://popucity.net/wp-content/uploads/2016/02/AMIE-1.0-1-1200x800.jpg>

**Fig.16:** Edifício a ser preparado para o transporte. Retrieved from [http://www.som.com/FILE/23896/aime\\_1575x900\\_oakridgenationallaboratory\\_04jpg.jpg](http://www.som.com/FILE/23896/aime_1575x900_oakridgenationallaboratory_04jpg.jpg)

**Fig.17:** Um dos mini robôs da equipa Minibuilders. Retrieved from <https://images.vice.com/motherboard/content-images/contentimage/15003/1409849337595699.JPG>

**Fig.18:** Robô em processo de execução. Retrieved from <http://42mzqz26jebqf6rd034t5pef-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2014/07/5.jpg>

**Fig.19:** Impressora Mataerial no processo de impressão. Retrieved from [http://i.vimeocdn.com/video/435719857\\_1280x720.jpg](http://i.vimeocdn.com/video/435719857_1280x720.jpg)



**Fig.20:** Apresentação do robô da FIMAtec. Retrieved from [http://www.kehy.fi/sites/default/files/pictures/fimatec\\_3d-tulostin\\_05032017.jpg](http://www.kehy.fi/sites/default/files/pictures/fimatec_3d-tulostin_05032017.jpg)

**Fig.21:** Identificação das vigas de ECC na Torre Yokohama. Retrieved from [http://towerlife.jp/m/images/070325\\_nabeaure-yokohama\\_054.jpg](http://towerlife.jp/m/images/070325_nabeaure-yokohama_054.jpg)

**Fig.22:** Substituição da junta de dilatação por trecho em ECC na ponte de Grove Street. Retrieved from [http://umich.edu/~acemrl/NewFiles/projects/link\\_slab\\_demo/DSCN3962.JPG](http://umich.edu/~acemrl/NewFiles/projects/link_slab_demo/DSCN3962.JPG)

**Fig.23:** Secção de o tronco de uma plameira. Retrieved from [https://d2gg9evh47fn9z.cloudfront.net/800px\\_COLOURBOX4872449.jpg](https://d2gg9evh47fn9z.cloudfront.net/800px_COLOURBOX4872449.jpg)

**Fig.24:** Amostra exemplificativa dos testes executados pela Arquitecta Neri Oxman. Retrieved from [http://matter.media.mit.edu/assets/images/made/assets/projects/VPCP-01\\_1500\\_998\\_80.jpg](http://matter.media.mit.edu/assets/images/made/assets/projects/VPCP-01_1500_998_80.jpg)

**Fig.25:** Muralha ornamentada com arcos entre Lechaio e Corinto. Retrieved from Gregory, T. E. (1979). The Late Roman Wall at Corinth. *Hesperia: The Journal of the American School of Classical Studies at Athens*, 48(3), 264–280. <https://doi.org/10.2307/147980>

**Fig.26:** Maqueta estereofunicular do Arquitecto Antoni Gaudi. Retrieved from [https://scontent.cdninstagram.com/t51.2885-15/e35/14719793\\_660640310781451\\_5796830373438554112\\_n.jpg?ig\\_cache\\_key=MTM2MTYyOTIzMjM0MTUzNDgxMQ%3D%3D.2](https://scontent.cdninstagram.com/t51.2885-15/e35/14719793_660640310781451_5796830373438554112_n.jpg?ig_cache_key=MTM2MTYyOTIzMjM0MTUzNDgxMQ%3D%3D.2)

**Fig.27:** Exemplo de “intrados” e “extrados”. Retrieved from [http://www.fastonline.org/CD3WD\\_40/CD3WD/CONSTRUC/SK03BE/GIF/P08A.GIF](http://www.fastonline.org/CD3WD_40/CD3WD/CONSTRUC/SK03BE/GIF/P08A.GIF)

**Fig.28:** Modelo das Catenárias de Gaudi desenhado por Axel Kilan e John Ochsendorf. Retrieved from Costa Couceiro, M. (2009, Janeiro 16). *Analogías biológicas en la arquitectura - del acercamiento biónico hacia los paradigmas de lo biodigital* (Ph.D. Thesis). Universitat Internacional de Catalunya. Obtido de <http://www.tdx.cat/handle/10803/9329>

**Fig.29:** Desenhos do Hotel Attraction de Gaudi. Retrieved from <https://i.pinimg.com/originals/ba/f7/aa/baf7aab91e7f26daf21c1f052301a8cd.jpg>

**Fig.30:** Estrutura montada a base de sacos de areia do Superadobe. Retrieved from [https://c1.staticflickr.com/9/8062/8234060156\\_7514d14320\\_h.jpg](https://c1.staticflickr.com/9/8062/8234060156_7514d14320_h.jpg)

**Fig.31:** Colapso de uma estrutura, determinado por Software FEA. Retrieved from <https://www.extremeloading.com/wp-content/uploads/HighRise.png>



**Fig.32:** Análise FEA a cores. Retrieved from <https://i.pinimg.com/736x/64/29/68/642968b897ca120fc8a78405b8ac1a62--cars-projects.jpg>

**Fig.33:** Render do esboço/protótipo. Fonte original.

**Fig.34:** Componentes de uma grua. Retrieved from <http://www.arqhys.com/construccion/fotos/construccion/Partes-de-la-grua-torre.gif>

**Fig.35:** Sistema telescópico da impressora APIS2000F. Retrieved from [http://apis-cor.com/images/ApisCorPrinter/ApisCor\\_printer\\_tcB@2x.png](http://apis-cor.com/images/ApisCorPrinter/ApisCor_printer_tcB@2x.png)

**Fig.36:** Componentes de uma grua. Retrieved from <http://www.apacks.com/images/content/products/pistons/tabletop-free-flowing/piston-filling-machine-clean-up.jpg>

**Fig.37:** Bomba de betão C50SS. Retrieved from <http://www.reedpumps.com/reedc50ssshotcretepump2015.jpg>

**Fig.38:** Controlador de movimentos Arduino Uno. Retrieved from [https://cdn-reichert.de/bilder/web/xxl\\_ws/B300/ARDUINO\\_UNO\\_A01.png](https://cdn-reichert.de/bilder/web/xxl_ws/B300/ARDUINO_UNO_A01.png)

**Fig.39:** Logotipo da impressora/grua. Fonte original.



**United States Patent** [19]  
**Hull**

[11] **Patent Number:** 4,575,330

[45] **Date of Patent:** Mar. 11, 1986

- [54] **APPARATUS FOR PRODUCTION OF THREE-DIMENSIONAL OBJECTS BY STEREO LITHOGRAPHY**
- [75] **Inventor:** Charles W. Hull, Arcadia, Calif.
- [73] **Assignee:** UVP, Inc., San Gabriel, Calif.
- [21] **Appl. No.:** 638,905
- [22] **Filed:** Aug. 8, 1984
- [51] **Int. Cl.<sup>4</sup>** ..... B29D 11/00; G03C 00/00
- [52] **U.S. Cl.** ..... 425/174.4; 425/174; 425/162; 264/22; 430/269; 156/58; 365/119; 365/120
- [58] **Field of Search** ..... 425/162, 174, 174.4, 425/425; 264/22, 183, 40.1; 430/269; 156/38, 58, 275.5; 365/107, 119, 127

4,252,514	2/1981	Gates	.....	425/162
4,288,861	9/1981	Swainson et al.	.....	365/127
4,292,015	9/1981	Hritz	.....	425/162 X
4,329,135	5/1982	Beck	.....	425/174
4,333,165	6/1982	Swainson et al.	.....	365/127 X
4,374,077	2/1983	Kerfeld	.....	264/22
4,466,080	8/1984	Swainson et al.	.....	365/127 X
4,471,470	9/1984	Swainson et al.	.....	365/127

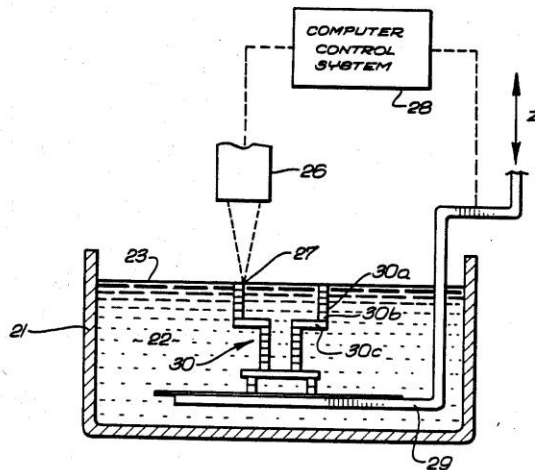
*Primary Examiner*—J. Howard Flint, Jr.  
*Attorney, Agent, or Firm*—Fulwider, Patton, Rieber, Lee & Utecht

[57] **ABSTRACT**

A system for generating three-dimensional objects by creating a cross-sectional pattern of the object to be formed at a selected surface of a fluid medium capable of altering its physical state in response to appropriate synergistic stimulation by impinging radiation, particle bombardment or chemical reaction, successive adjacent laminae, representing corresponding successive adjacent cross-sections of the object, being automatically formed and integrated together to provide a step-wise laminar buildup of the desired object, whereby a three-dimensional object is formed and drawn from a substantially planar surface of the fluid medium during the forming process.

- [56] **References Cited**
- U.S. PATENT DOCUMENTS**
- |           |         |                 |       |             |
|-----------|---------|-----------------|-------|-------------|
| 2,708,617 | 5/1955  | Magat et al.    | ..... | 264/183 X   |
| 2,908,545 | 10/1959 | Teja            | ..... | 264/22 X    |
| 3,306,835 | 2/1967  | Magnus          | ..... | 425/174.4 X |
| 3,635,625 | 1/1972  | Voss            | ..... | 425/162 X   |
| 3,775,036 | 11/1973 | Winning         | ..... | 425/174.4   |
| 3,974,248 | 8/1976  | Atkinson        | ..... | 425/162 X   |
| 4,041,476 | 8/1977  | Swainson        | ..... | 365/119     |
| 4,078,229 | 3/1978  | Swainson et al. | ..... | 365/107     |
| 4,081,276 | 3/1978  | Crivello        | ..... | 430/269     |
| 4,238,840 | 12/1980 | Swainson        | ..... | 365/119     |

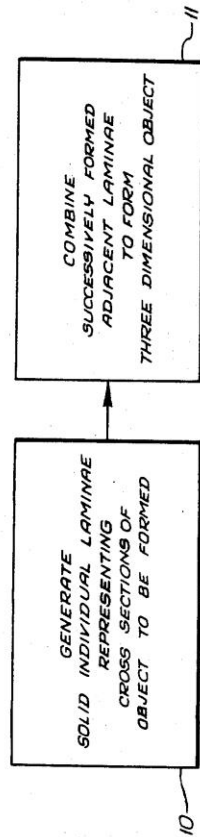
47 Claims, 8 Drawing Figures







*Fig. 1*



*Fig. 2*

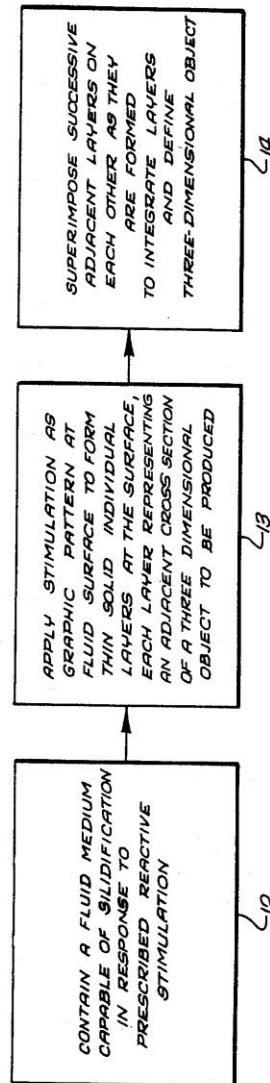




FIG. 3

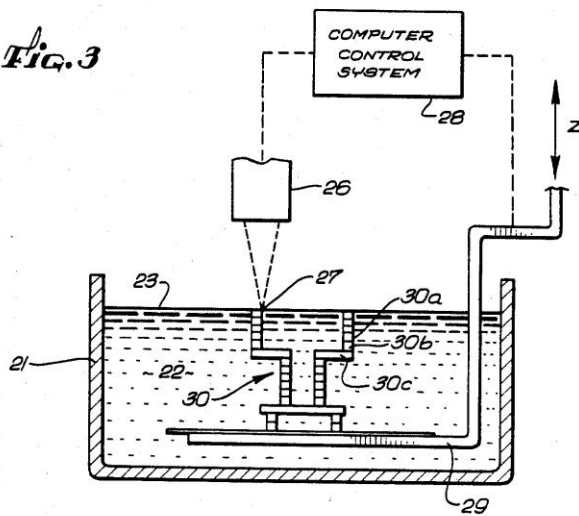


FIG. 4

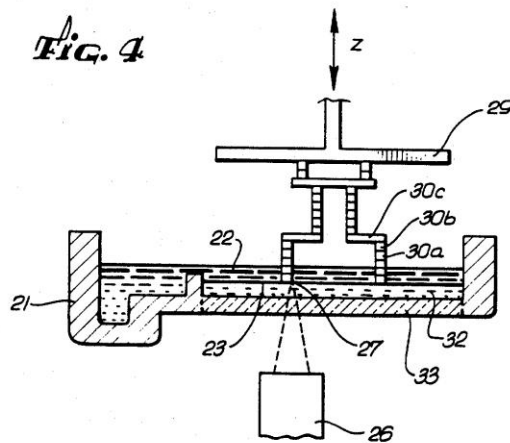




Fig. 5

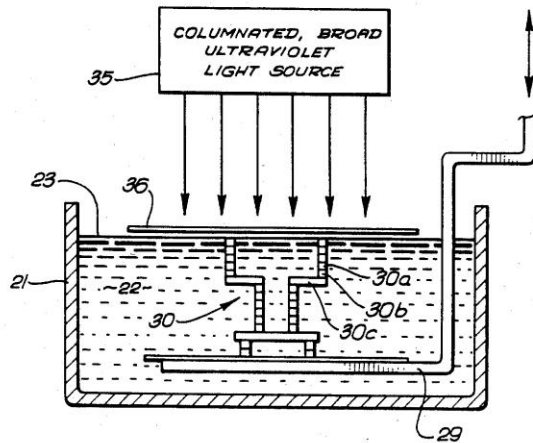


Fig. 6

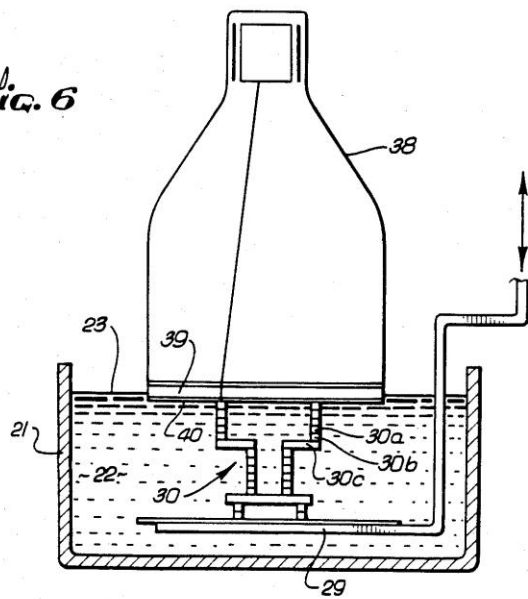




Fig. 7

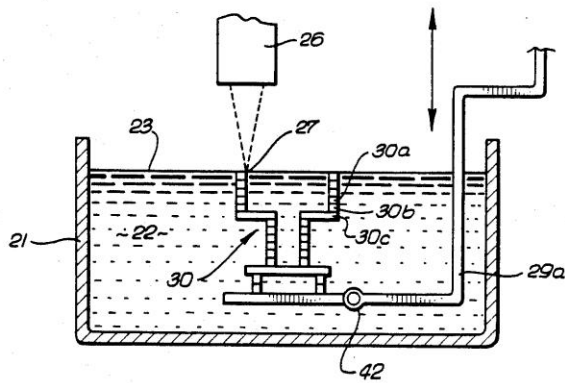


Fig. 8

