

Processos de Fabricação Aditiva. Oportunidades Emergentes em Arquitetura.

Dissertação de Mestrado Integrado em Arquitetura apresentado à
Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto por:
João Guilherme Abreu Carvalho

Orientador

Professor Doutor José Pedro Sousa

Porto, 2018

Agradecimentos:

Queria agradecer em especial, ao Prof. José Pedro Sousa por todo o apoio e dedicação demonstrado na orientação desta tese.

Aos meus colegas no DFL pelos contributos.

A toda a minha família, por tudo.

À Teresa, que me acompanhou neste percurso.

A todos, obrigado.

Este trabalho é dedicado aos meus pais, José e Bernardete.

Resumo

Nos últimos 20 anos, a exploração da Fabricação Digital em Arquitetura tem crescido exponencialmente, complementando o processo de consolidação do desenho digital na prática do projeto. Entre as várias tecnologias, a *Fabricação Aditiva* (FA) caracteriza-se por um conjunto de processos que, de forma seletiva, adicionam material apenas onde este é necessário. Esta abordagem constituiu o seu aspeto mais distinto, permitindo materializar geometrias dificilmente executáveis por outros métodos de produção. Motivado pela verificação destas capacidades, a presente tese procura estudar a integração da FA na Arquitetura.

Esta investigação começa por compreender os princípios, características e funcionamento da tecnologia, assim como os âmbitos em que está a ser aplicada. Em seguida, identificam-se os desafios e constrangimentos que a FA enfrenta na Arquitetura devido à natureza e complexidade específicas do seu produto – o edifício –, como a escala, a materialidade e a construção. Assim, descreve-se a assimilação e a integração da FA na Arquitetura, desde a utilização na produção de maquetes, até ao desenvolvimento e aplicação de tecnologias específicas para a construção de edifícios. Com o intuito de compreender as oportunidades que emergem deste campo, examina-se o impacto da FA em três dimensões da Arquitetura: representação, construção e materialidade, ilustrando com casos-de-estudo (por exemplo, trabalhos desenvolvidos por Mark Burry, Zaha Hadid, Neri Oxman, Gramazio & Kohler, etc.) e apoiando-se na experiência prática do autor.

A conclusão desta investigação entende que a utilização deste tipo de meios pode libertar o arquiteto de certos constrangimentos que definem a conceção em Arquitetura, podendo dar origem a novas expressões e lógicas de produção, mas também levantar algumas problemáticas. Assim, a presente tese constrói uma reflexão crítica e ilustrada sobre as oportunidades emergentes da FA na prática da Arquitetura.

Palavras-chave: Projeto de Arquitetura; Construção em Arquitetura; Fabricação Aditiva; Impressão 3D; Tecnologias Digitais.

Abstract

In the last 20 years, the exploration of Digital Fabrication in Architecture has grown exponentially, complementing consolidation of the digital design processes in the design practice. Among the various technologies, *Additive Fabrication* (FA) is characterized by a set of processes that selectively add material only where it is needed. This approach constituted its most distinct aspect, allowing the materialization of difficult execution geometries by other methods of production. Motivated by the verification of these capacities, this thesis seeks to study the integration of FA in Architecture.

The research begins by understanding the principles, characteristics and operation of the technology, as well as the scopes in which it is being applied. Then, it identifies the challenges and constraints that FA faces in Architecture due to the specific nature and complexity of its product - the building - such as scale, materiality and construction. Following, the thesis describes the assimilation and integration of FA in the Architecture, from the use in the production of models, to the development and application of specific technologies for the construction of buildings. In order to understand the emerging opportunities to influence the discipline of architecture and its processes, the author examines the impact of FA at three levels - representation, construction and materiality – by analyzing several case studies (eg, works developed by Mark Burry, Zaha Hadid, Neri Oxman, Gramazio & Kohler, etc.), and describing the author's practical experience.

The conclusion of this research understands that the use of FA can free the architect of certain constraints that frame the design in Architecture, being able to give rise to new expressions and logics of production, but also raise some problems. Thus, the present thesis draws a critical and illustrated reflection on the emergent opportunities of the FA in the practice of Architecture.

Key words: Architectural Project; Construction in Architecture; Additive Fabrication; 3D Printing; Digital Technologies.

Nota:

Por decisão do autor, todas as citações em Inglês foram escritas em Português e traduzidas pelo próprio.

Índice

Capítulo 1.	Introdução		11
1.1.	Motivação	12	
1.2.	Objeto	12	
1.3.	Objetivo	13	
1.4.	Metodologia	14	
1.5.	Organização	14	
Capítulo 2.	Tecnologia		17
2.1.	Fabricação Aditiva	18	
	2.1.1. <i>Conceito</i>	20	
	2.1.2. <i>História</i>	27	
	2.1.3. <i>Processos</i>	33	
2.2.	Características	41	
	2.2.1. <i>Finalidades</i>	41	
	2.2.2. <i>Desenho</i>	49	
	2.2.1. <i>Materiais</i>	58	
Capítulo 3.	Assimilação		63
3.1.	Da Natureza da Arquitetura	64	
3.2.	Integração da Fabricação Aditiva	71	
	3.2.1. <i>Da produção de maquetes...</i>	71	
	3.2.2. <i>...à construção de edifícios</i>	84	
Capítulo 4.	Oportunidades		99
4.1.	Representação	101	
4.2.	Construção	113	
	4.2.1. <i>Revestimento</i>	114	
	4.2.2. <i>Estrutura</i>	122	
	4.2.3. <i>Edifício</i>	134	
4.3.	Materialidade	144	
4.4.	Experiência pessoal	160	
Capítulo 5.	Conclusão		171
5.1.	Considerações	172	
5.2.	Especulação	177	
5.3.	Investigação futura	180	
	Lista de Acrónimos	183	
	Bibliografia	185	
	Lista de Figuras	197	

Capítulo 1

Introdução

1.1. Motivação

A ideia para a realização da presente dissertação resulta do interesse pessoal pelas novas tecnologias aplicadas ao projeto e construção em Arquitetura que foi emergindo durante a minha formação na FAUP. Nos dias de hoje é difícil pensar projetar um edifício sem recorrer ao uso do computador. Esta tecnologia tem aberto várias possibilidades de assistir o trabalho de projeto, primeiro através do desenho e, mais recentemente, através da Fabricação Digital, afirmando-se cada vez mais como um importante contributo para o campo da construção. Assim, ferramentas como o desenho paramétrico ou a fabricação robótica despertaram o meu interesse pelas possibilidades de automação, das quais tive um primeiro contacto e aprofundamento através da minha colaboração, enquanto estudante, no Laboratório de Fabricação Digital do CEAU/FAUP. A experiência adquirida neste grupo de investigação, e concretamente através da participação em vários trabalhos, conduziram à formulação da presente proposta de dissertação de mestrado integrado em Arquitetura.

1.2. Objeto

Está implementado no quotidiano de quase toda a sociedade contemporânea um mundo digital paralelo ao físico. Tudo é transformado em informação, em números, desde localizações, comunicações, compras, relações, preferências pessoais, etc. Contudo, *“depois de se viver um período dedicado à digitalização do mundo físico, assistimos atualmente a uma inversão das intenções, centrado na materialização do mundo digital”* (Malé-Aleman 2012: 15). Desta forma, é notório um interesse crescente por tecnologias capazes de materializar diretamente a partir de informação digital, como, por exemplo, na disciplina da Arquitetura, onde tais são apeladas de tecnologias de Fabricação Digital. Como diz Kolarevic (2003: 88) *“Esta nova capacidade de gerar informação de construção diretamente a partir da informação do desenho, e não as formas curvas complexas, é o que define o aspeto mais profundo de grande parte da arquitetura contemporânea”*. Estes processos fazem repensar a ação do arquiteto, entre a conceção, representação, comunicação e construção. Dos vários processos digitais existentes, a Fabricação Aditiva assume-se como um dos mais disruptivos e ubíquos. Por essa razão, afigura-

se pertinente iniciar uma reflexão sobre este tema, ainda que esta tecnologia possa estar um pouco longe de ser uma prática corrente em Portugal.

A Fabricação Aditiva está a ter uma crescente utilização na produção de objetos nas mais diversas áreas, desde a medicina à aeronáutica, revelando o potencial da exploração de novas formas de desenho e de produção, difíceis, senão impossíveis, de construir por outros meios. Construindo pela adição seletiva de material, estes processos permitem características como uma maior liberdade formal, precisão e eficiência, sem que estas impliquem custos adicionais. Inventada no início da década de 80 do século passado, a Fabricação Aditiva tem estado, nos últimos anos, num processo de maturação. Após uma fase em que era utilizada para a materialização de protótipos em indústrias tecnologicamente avançadas nos meios digitais, começaram a surgir indícios de que também poderia vir a ser adequada para a construção de produtos finais, funcionais. Para a indústria, este é o ponto verdadeiramente relevante. A passagem dos processos de *prototipagem rápida* para a produção do *objeto final*, abre novas possibilidades de produção, como a personalização ou a produção variável em série. Mais recentemente, verificou-se este segmento de acontecimentos foi aplicado também na Arquitetura, em que pelo desenvolvimento de técnicas de Fabricação Aditiva à grande escala, como o *Contour Crafting*, permitiu a passagem da construção de maquetes para a construção efetiva de edifícios. A aplicação desta tecnologia na Arquitetura, tal como aconteceu com outras áreas, poderá trazer eventuais benefícios para a construção, e concretamente novas possibilidades de desenho, de projeto e de materialidades na Arquitetura.

1.3. Objetivo

A presente dissertação tem como objetivo examinar o impacto dos processos de Fabricação Aditiva na Arquitetura, designadamente:

- Comparar a Fabricação Aditiva com outros métodos;
- Efetuar uma análise histórica da sua evolução, geral e aplicada;
- Estudar as possibilidades técnicas atuais;
- Investigar as características da aplicação deste novo conceito;
- Compreender as dificuldades da integração na Arquitetura;
- Identificar e analisar projetos que mostrem a aplicação da tecnologia na disciplina;

- Refletir sobre o impacto - evolução, continuidade e/ou total rutura - no desenho e construção da Arquitetura;
- Compreender e experimentar o seu funcionamento na prática;
- Desenvolver a consciência crítica, com base na investigação teórica e prática.

1.4. Metodologia

O desenvolvimento da dissertação combina tarefas de carácter teórico e prático, acordo com a seguinte metodologia:

- Consulta bibliográfica, em diversos campos disciplinares, como a Arquitetura, construção, engenharia e tecnológica;
- Levantamento e análise de exemplos e casos de estudo que aplicaram as tecnologias de Fabricação Aditiva, quer nas áreas da medicina, *design* de produto, automóvel e aeroespacial, quer na prática da Arquitetura, incluindo a fabricação de maquetes e construção à escala 1:1;
- Aquisição de conhecimentos práticos da tecnologia, através do desenvolvimento de vários projetos que requerem aprendizagem das especificidades técnicas deste método de fabricação, desde o domínio das tecnologias digitais ao funcionamento da máquina de Fabricação Aditiva.

1.5. Organização

Esta dissertação está organizada em seis capítulos:

- *Capítulo 1, Introdução:* Este capítulo apresenta as motivações e o tema da presente dissertação. É elaborado o plano metodológico utilizado na realização do trabalho, definindo a organização no qual serão apresentadas as contribuições.

- *Capítulo 2, Tecnologia:* Irá definir e explicar a tecnologia de Fabricação Aditiva do ponto de vista genérico, através: da explicação do seu conceito e funcionamento, uma análise histórica, da revisão das várias técnicas existentes e da sua aplicação na produção de objetos. Este capítulo ajudará a compreender as características intrínsecas que esta tecnologia tem na sua aplicação, na medida em que poderá ser mais vantajosa quando comparada com outros métodos de produção.
- *Capítulo 3, Assimilação:* Após a compreensão da Fabricação Aditiva e a forma como está a ser utilizada noutras áreas de projeto, serão abordadas, por comparação, duas questões relevantes: primeiro, as dificuldades que a tecnologia enfrenta na integração à realidade da Arquitetura; e segundo, a integração da tecnologia na disciplina, desde a construção de modelos físicos até às primeiras experiências e atual desenvolvimento na construção real.
- *Capítulo 4, Oportunidades emergentes:* Representa um conjunto de projetos que, na sua globalidade, enumeram as oportunidades que a disciplina da Arquitetura poderá obter com a utilização da Fabricação Aditiva. Cada um destes exemplos irá representar um aspeto específico da Arquitetura, assim como uma ou mais características atribuídas pelo método construtivo. Neste capítulo irá também constar a assimilação de tais possibilidades por via da experimentação pessoal, realizadas no decorrer do plano de estudos, demonstrando a preocupação em apoiar a investigação teórica com o conhecimento prático.
- *Capítulo 5, Conclusão:* Ao contrário dos capítulos anteriores que expõem a investigação realizada, este dedica-se à reflexão das questões levantadas ao longo do trabalho, admitindo as vantagens e desafios da Fabricação Aditiva na produção de Arquitetura.

Capítulo 2

Tecnologia

Neste capítulo será analisado o contexto e os princípios básicos do funcionamento da Fabricação Aditiva. Antes de se perceber a integração na Arquitetura, é importante ilustrar a técnica, de forma a, por um lado, compreender melhor as características que a tornam distinta de outros processos de fabricação e, por outro, perceber qual o impacto que atualmente está a ter noutras disciplinas.

Para melhor explicar esta tecnologia, será feita uma breve revisão do estado da arte da Fabricação Aditiva, com base nos seguintes aspetos: a definição e descrição do funcionamento de FA; uma breve análise histórica; a categorização dos diferentes processos existentes; e, por fim, uma abordagem comparativa que relaciona a sua aplicação com as características que a mesma pode atribuir aos objetos produzidos, comprovando-o com alguns exemplos de várias áreas disciplinares.

2.1. Fabricação Aditiva

À semelhança de outras áreas de produção, na disciplina da Arquitetura e da construção a materialização de um edifício pode ser compreendida em dois processos: o desenho, enquanto representação e comunicação da solução antes de ser materializada, e a manufatura, como processo necessário para alcançar a produção física do objeto pretendido. Na *Era da Informação* a relação entre estes dois processos é estrita. O desenho, a análise, a apresentação e a produção tornam-se parte de um processo colaborativo, em que, através de um único meio, o digital, é possível interligar todas as etapas. Esta possibilidade é designada por Kolarevic (2003: 9) como um *contínuo digital*. Desta forma, enquanto que as *Tecnologias de Desenho* são encarregues de controlar a informação gerada com auxílio dos meios computacionais, as *Tecnologias de Manufatura* definem-se como as máquinas assistidas por computador capazes de construir objetos físicos diretamente da informação gerada por meios digitais (Sousa 2010: 73). Das tecnologias digitais utilizadas na Arquitetura e concretamente no desenho, podemos destacar: o *Desenho Assistido por Computador* (CAD), a *Engenharia Assistida por computador* (CAE) e a *Manufatura Assistida por Computador* (CAM). Esta última, segundo Branko Kolarevic (2001), pode subdividir-se em três campos, de acordo com a ação exercida sobre o material: *Subtrativa*, *Formativa* e *Aditiva*.

- *Fabricação Subtrativa*: Como o próprio nome indica, “*envolve a remoção específica de volume material a partir de sólidos*” (Kolarevic 2001: 271). Numa lógica escultural, é a partir de uma peça em bruto que é retirado o material necessário até atingir o objeto final. Este processo pode ser feito no mesmo plano por contorno bidimensional, mas também numa abordagem volumétrica tridimensional [Figura 2.1]. Porém, a grande desvantagem deste processo é o elevado desperdício, uma vez que o material não subtraído é inutilizável, caso não seja processado para reciclagem.
- *Fabricação Formativa*: Os processos formativos, ao contrário dos processos de subtração, criam o objeto por deformação do material [Figura 2.1]. “*Forças mecânicas, formas restritas, calor ou vapor são aplicados num material de*

modo a alcançar a forma desejada através de remodelação ou deformação, que pode ser axial ou superficial” (Kolarevic 2001: 273). Ora, estes processos são normalmente bastante complexos e dispendiosos, devido à utilização de moldes personalizados. É um dos processos mais utilizados na produção industrial, sobretudo nas indústrias de produção de plásticos ou na metalúrgica.

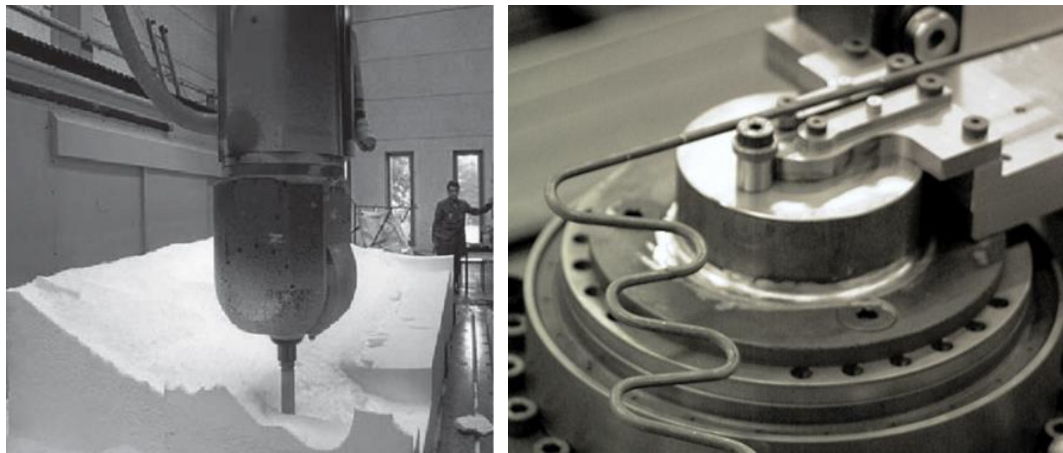


Figura 2.1 – Tecnologias de fabricação. Fabricação Subtrativa, Fresagem dos moldes de betão para as Zollhof Towers em Dusseldorf, de Frank Gehry, 1999 (esquerda); Fabricação Formativa, Wire Bending para a fabricação da instalação CLOUDS OF VENICE do Supermanoeuvre, para a International Venice Architecture Biennale, 2012 (direita).

- *Fabricação Aditiva:* Em oposição às anteriores, o princípio básico do funcionamento das tecnologias de Fabricação Aditiva é a construção de objetos através de uma abordagem de adição livre de material, produzindo-os diretamente a partir de modelos digitais gerados por computador [Figura 2.2]. Kolarevic (2001: 272) define como “*formação incremental ao adicionar material*”, e Hopkinson et al. (2006: 1) como um “*processo automático de produção [...] para construir peças que são diretamente usadas como componentes ou produtos finais*”. Uma definição mais técnica é dada pela ISO/ASTM (2015) - órgão que define e publica normas técnicas –, que descreve a FA como: “*Um processo de juntar materiais para fazer objetos a partir de dados de modelos digitais 3d, normalmente por camada sobre camada, em oposição às metodologias de produção subtrativa*”.

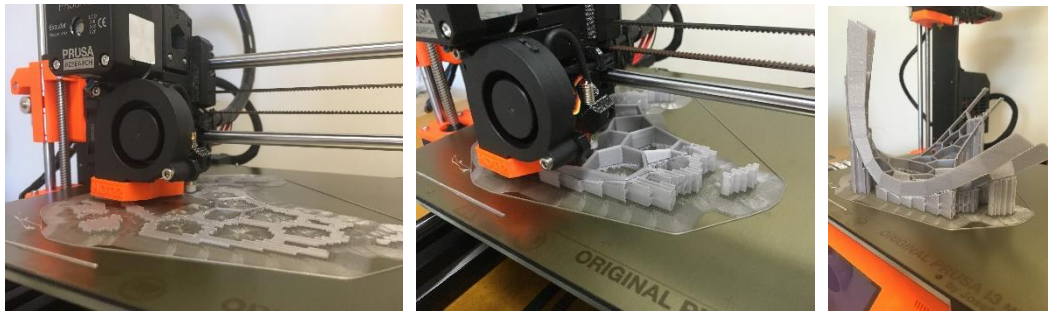


Figura 2.2 – Fabricação Aditiva. Exemplificação do modo de operar, com a fabricação de uma maquete, por uma máquina do tipo Material Extrusion.

2.1.1. Conceito

A característica singular da Fabricação Aditiva reside no seu processo de funcionamento, uma vez que permite alcançar resultados distintos quando comparado com outras tecnologias de produção. O processo é resumido por Kolarevic da seguinte forma: "*Todas as tecnologias de fabricação aditiva partilham o mesmo princípio de que o modelo digital é "fatiado" em camadas bidimensionais. A informação de cada camada é então transferida para a extremidade de processamento da máquina de produção e o produto físico é incrementalmente gerado numa forma camada por camada*" (Kolarevic 2001: 272). A máquina de FA pode ser comparada, de certo modo, com uma impressora de jato de tinta convencional. Contudo, o material que é "impresso" tem uma espessura, em que cada "*camada é uma fina secção transversal da peça derivada da informação CAD original*" (Gibson et. al 2015: 2). Através da sua sobreposição, passam de imagens bidimensionais a objetos tridimensionais. A qualidade de acabamento do resultado final, ou seja, a leitura das diversas camadas será sempre influenciada pela espessura das mesmas, dado que, quanto mais finas forem, mais suaves serão as superfícies e mais aproximado será do modelo digital. Por outro lado, quanto mais finas forem as camadas, maior o número de passagens que a ferramenta terá de fazer e, por conseguinte, maior o tempo de fabricação [Figura 2.3]. Daí a necessidade de estabelecer um equilíbrio entre o tempo e acabamento, de acordo com a utilidade pretendida para o objeto fabricado.

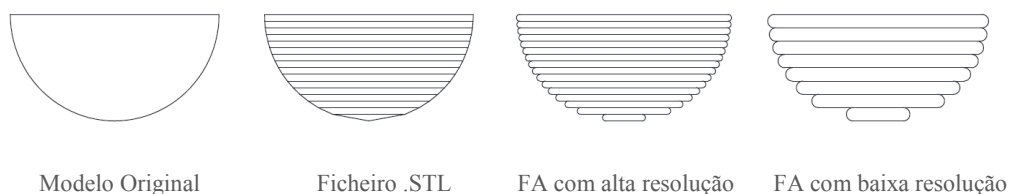


Figura 2.3 – Esquema da relação entre o ficheiro digital e a materialização de um objeto.

Existem várias técnicas de FA que produzem resultados finais distintos. Por exemplo, algumas técnicas podem utilizar como material base um líquido ou um pó, depositar materiais sólidos ou aglutinantes (ver capítulo 2.3). É o tipo de técnica utilizado que irá influenciar o resultado final, pois cada uma destas tem características diferentes entre si, tais como: a qualidade de acabamento, a ligação entre camadas, a resistência material, o trabalho de pós-produção, a dimensão permitida, o tempo e custo de execução. No geral, cada máquina de FA [Figura 2.4] é composta por dois ou três sistemas, dependendo da técnica: o sistema de deposição (material, aglutinante ou energia), o sistema de movimento, (que transporta a ferramenta de deposição ou a base) e, em alguns casos, o sistema de alimentação e nivelção da camada base de material.



Figura 2.4 – Máquinas de FA. Máquina de secretária, acessível ao consumidor, instalada no DFL/FAUP (esquerda); Máquinas de utilização industrial, para fabricação em metal (direita).

Segundo a análise de Gibson et. al (2015), para a produção de um objeto por meio desta tecnologia, habitualmente é necessário um conjunto de passos básicos, designadamente: o desenho CAD; a conversação do desenho CAD para um ficheiro .STL (ficheiro utilizado para seccionar a horizontalmente o modelo por camadas) [Figura 2.5]; a calibração da máquina; a produção do objeto; e a pós-produção, que pode requerer trabalho manual (remoção de suportes, pintura, acabamento de texturas, ou montagem) [Figura 2.6].

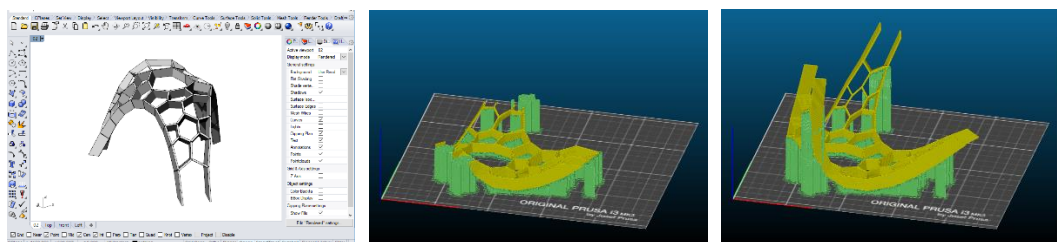


Figura 2.5 – Processo digital. Modelação tridimensional do objeto (esquerda); Preparação do ficheiro de fabricação .STL (centro e direita).

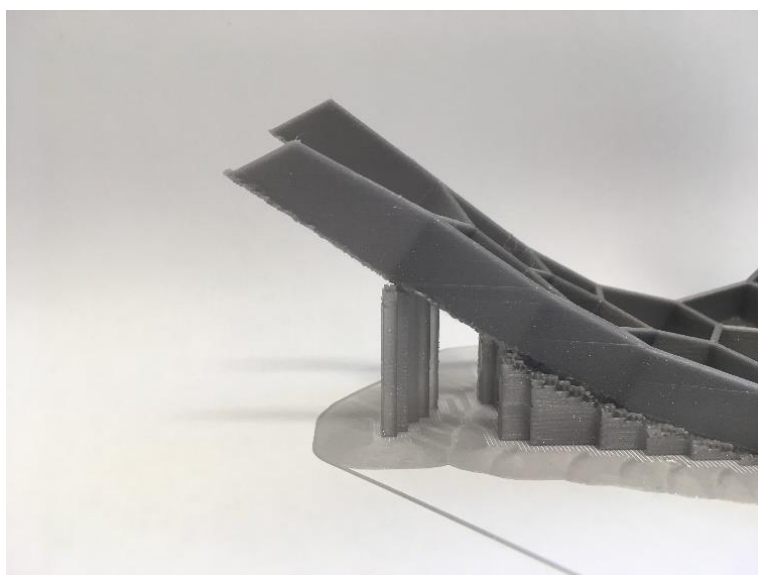
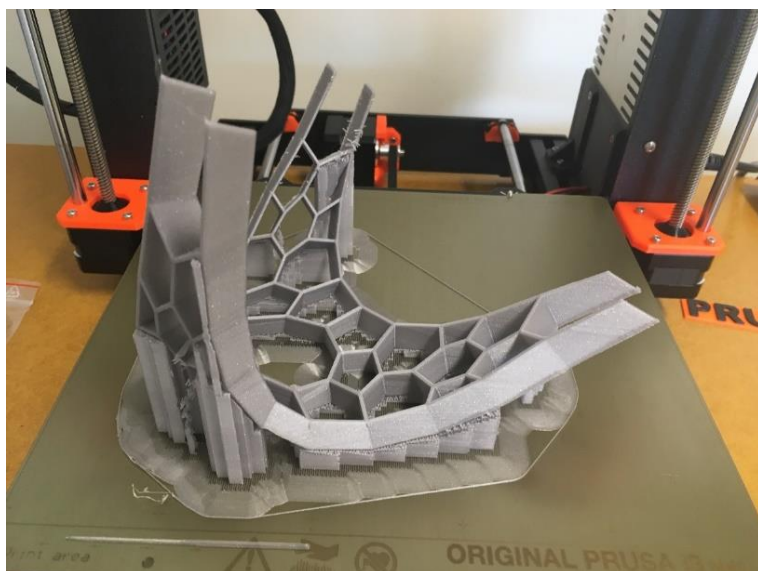


Figura 2.6 – Elementos necessários a ter em conta no trabalho de pós-produção. Maquete em cima do tabuleiro da máquina após a fabricação, demonstrando a forma como esta é apoiada em suportes (em cima); Pormenor de um suporte numa zona com ângulo superior a 45°, em que também é visível a leitura das camadas e algumas falhas de produção que podem ser alvo de acabamentos de superfície (em baixo).

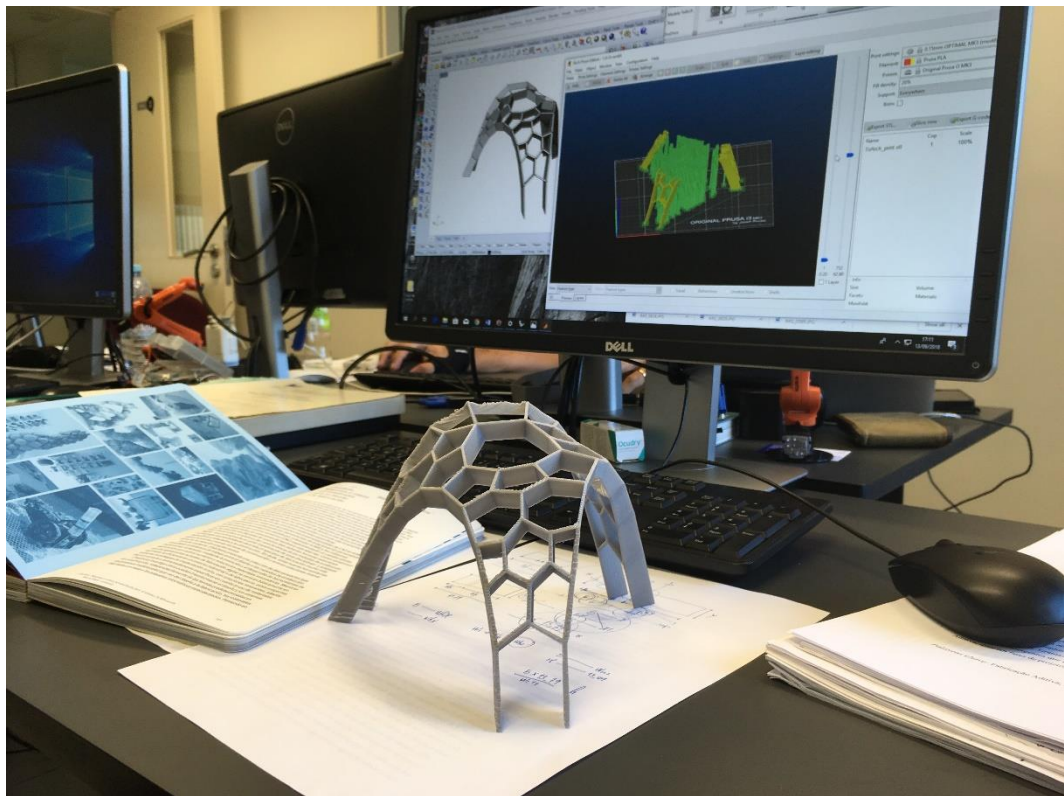


Figura 2.7 – Objeto final. Todo o processo de materialização da modelo digital pode ser feito num ambiente de escritório, sem que seja necessário recorrer à prestação de serviços externos. Todo este processo foi feito no Digital Fabrication Laboratory, no âmbito do projeto Tri-Arch, aprofundado no capítulo 4.

Características

Em diversas áreas, a introdução das tecnologias digitais, como os sistemas de CAD/CAM, significaram um grande avanço, revelando uma nova capacidade, quer para projetar, quer para construir. Neste contexto, a FA pode ser vista como uma evolução nos métodos de produção. Por outro lado, pode também ser encarada como uma tecnologia capaz de repensar o que é permitido fazer atualmente e de encontrar novas possibilidades que seriam quase impossíveis de alcançar por outras ferramentas [Figura 2.8]. Abaixo estão descritas algumas das características inerentes ao funcionamento desta tecnologia, que a poderão tornar disruptiva em relação às demais:

- *Versatilidade:* Um produto só é desenhado com base na viabilidade da sua materialização. Na produção convencional, a execução de uma peça está diretamente relacionada com a complexidade do desenho e com custos associados ao mesmo. Em contrapartida, na FA, a geometria não é um fator limitativo, pois consegue realizar todo o tipo de formas, sem que isso implique custos adicionais ou correlacionados com a complexidade formal.
- *Material:* O material utilizado é o estritamente necessário para a construção da peça, não havendo quase desperdício de material, contrariamente ao que acontece nos processos subtrativos. Este é um dos aspetos mais positivos desta tecnologia, sobretudo num mundo que se quer mais sustentável. Por outro lado, esta tecnologia também vai permitir que se explore novos materiais e novas formas de aplicação.
- *Única etapa:* Por ser feita de uma só vez, a redução de passos permite concentrar a fabricação num único processo, diminuindo as tarefas manuais intermédias. Deste modo, a qualidade técnica e a interpretação do executante deixam de ser uma questão relevante. O tempo de produção de uma peça passa, assim, a ser exato, ficando como única incerteza o tempo de projeto e modelação 3D.
- *Sem ferramentas:* Outro constrangimento ultrapassado é a ausência da necessidade de utilização de ferramentas adicionais ou moldes que, normalmente, são dispendiosos e condicionam significativamente o desenho, como é comum em processos formativos.

- *Custos:* Apesar do valor de aquisição e funcionamento serem apontados como uma das desvantagens da FA, o número de recursos necessários para a sua utilização acaba por ser inferior em relação aos outros métodos de produção.

Ainda assim, a FA tem algumas limitações que terá de ultrapassar. Os maiores problemas apontados, em comparação com os métodos de produção correntes, são: a superfície de acabamento, em que nalgumas técnicas é possível ver-se as diferentes camadas da deposição do material; o tempo de fabricação, cujas dimensões das peças estão limitadas ao tamanho da máquina que, todavia, tem vindo a aumentar nos últimos anos; o elevado investimento de aquisição; e as propriedades materiais alcançadas que, por norma, são mais fracas (Volkers, 2010).

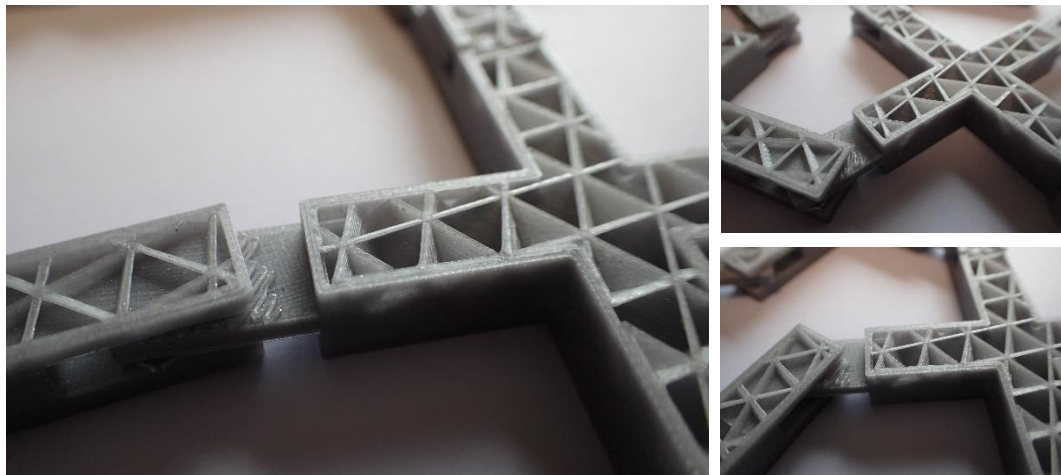


Figura 2.8 – Pormenor de uma junta. Nesta imagem verifica-se uma dobradiça articulada, produzida diretamente e de uma só vez por uma máquina de extrusão de plástico. Esta é umas das capacidades oferecidas pela liberdade de materialização geométrica oferecida pela FA. Ainda nesta imagem verifica-se que esta é uma peça inacabada, no qual torna-se visível o preenchimento interior parcialmente oco, outra das características possíveis a fim de minimizar as quantidades de material.

Terminologia

Desde o seu aparecimento, vários foram os termos utilizados para designar estas tecnologias, baseando-se sobretudo na descrição do funcionamento e nas várias possibilidades de utilização. Gardiner (2011) identifica as seguintes: *Rapid prototyping*, *Rapid Tooling*, *Rapid Manufacturing*, *Solid Freeform Fabrication*, *3D Printing*, *Direct Manufacturing*, *Layered Manufacturing*, *Direct CAD Manufacturing*, *Desktop Manufacturing*, *Additive Manufacturing*.

Rapid Prototyping ou *Prototipagem Rápida* foi provavelmente o termo mais utilizado no passado, quando a tecnologia foi usada por diversas indústrias como um processo para a construção de modelos de teste e verificação de produto. No contexto do desenvolvimento de produto, este processo foi descrito como a tecnologia capaz de produzir protótipos físicos exatos, de forma mais facilitada para empresas que já tinham passado pelo processo de modernização digital (Gibson et. al 2015). Contudo, este termo tornou-se desatualizado, pois não era capaz de descrever os avanços alcançados nos últimos anos, que permitiram aumentar a qualidade das peças produzidas, a ponto de atingir a qualidade de produto final. Daí, a utilização da palavra "protótipo" tornar-se dispensável. Ainda assim, parece haver uma intenção, por parte de alguns autores, de continuar a utilizar o termo *Prototipagem Rápida* em contraponto à produção final. Como defende Hopkinson et al. (2006), a *Fabricação Rápida* tem vindo a crescer nos últimos anos, de tal forma que deva ser considerada como uma disciplina independente dos seus precedentes *Prototipagem Rápida* e *Ferramenta Rápida*.

Freeform Fabrication ou *Solid Freeform Fabrication* refere-se à capacidade que este processo tem de construir praticamente qualquer geometria, sem que a complexidade tenha custos acrescidos revelando, assim, a independência da forma em relação ao processo de produção (Gibson et. al 2015). Os termos *Stereolithography* (SLA) e *3D Printing* (3DP ou Impressão 3D em Português), que designam duas técnicas, foram, várias vezes, utilizados para descrever a tecnologia no geral, à semelhança do termo *Impressão 3D*, que tem vindo a ser a designação mais usada popularmente. O Wohlers Report 2015 indica que a Google gerou, até à data, 4,6 milhões de referências com o termo *Additive Manufacturing*, 89,1 milhões para *3D Printing* e 91,3 milhões de pesquisas para *3-D Printing* (Abreu 2015). Apesar de ser a designação mais utilizada, não será o termo escolhido, pois "impressão" remete para a reprodução de informação, em que o objeto produzido não é, em si mesmo, o propósito final. Pelo contrário, a questão da presente dissertação é a aplicação da tecnologia na Arquitetura, ou seja, o meio para a produção do objeto final.

O termo *Additive Manufacturing* procura salientar a característica principal da tecnologia, isto é, o seu processo único de adicionar camadas de material, distinguindo-se dos processos por subtração. Neste momento, é o termo mais utilizado e aceite, quer pela terminologia *standard* ISO/ASTM, quer pela maior consultora da indústria - a Wohlers Associates e, até mesmo, por diversos autores. À data da escrita desta dissertação, este é o termo que melhor parece caracterizar a tecnologia. A tradução literal do termo para português seria *Manufatura Aditiva*. Porém, nos últimos anos, e sobretudo na Arquitetura, o termo *Fabricação Digital* começou a ser

utilizado para designar os processos de construção que operam diretamente a partir dos meios digitais. Consequentemente, e por referência direta a estes processos, irá ser utilizada a palavra *Fabricação* em vez de *Manufatura*. Assim sendo, esta tecnologia será doravante designada por *Fabricação Aditiva* e, na sua forma abreviada, por *FA*.

2.1.2. História

A invenção da impressão por estampagem em madeira e, posteriormente, o desenvolvimento de sistemas de impressão à escala industrial no século XV revolucionaram a reprodução rápida de informação em texto e imagens. Agora, um novo método poderá ter o mesmo impacto, só que, desta vez, a três dimensões. Várias foram as invenções que deram origem à tecnologia tal como a conhecemos hoje. As bases da Fabricação Aditiva podem ser associadas à *Topografia* e à *Foto-escultura*, que surgiram há mais de 150 anos. A partir destas, com o desenvolvimento tecnológico, surgiram técnicas modernas mais aperfeiçoadas, que evoluíram desde a execução manual até à total automação.

Técnicas Precedentes

A *Topografia* foi um método proposto por Blather, na década de 1890, para fazer modelos de mapas topográficos com relevo. A técnica passava por imprimir os contornos topográficos, um por um, em placas de cera que, depois de cortadas pelo perímetro, eram sobrepostas umas às outras. Deste processo resultavam dois moldes tridimensionais: um negativo e outro positivo correspondente ao terreno. Entre estes era prensado o mapa em papel que, por sua vez, criava o relevo no mapa final (Blather 1892). Perera (Perera 1937), com uma abordagem semelhante, propôs um método de fazer um mapa de relevo, cujo princípio passava por cortar várias placas de cartão pelo limite das curvas de nível e, depois, sobrepô-las umas às outras, criando o mapa tridimensional. Em 1974, DiMatteo percebeu que as potencialidades dos métodos de laminação podiam ser utilizadas para construir superfícies particularmente difíceis de fabricar pelos métodos mecânicos convencionais à época. A sua solução passava, então, por uma fresa de corte que contornava placas de metal e que, quando agregadas umas às outras, criavam o objeto pretendido. Este processo é uma versão da *Topografia* do século XIX, mas com o uso de ferramentas mecânicas (DiMatteo 1974).

A *Foto-escultura* foi um método controverso para tentar criar réplicas exatas de objetos ou até pessoas em relevo, através de reprodução fotográfica, sem que fosse necessária a intervenção de um escultor. François Willème foi o inventor desta técnica em 1860. Uma pessoa ou um objeto era colocado no centro de uma sala circular e fotografado simultaneamente por 24 câmaras dispostas equitativamente no perímetro da sala. Um artesão esculpia o contorno de uma das 24 porções cilíndricas, usando a silhueta fotografada (Bourell et al. 2009). Este método acabou por não ter grande aceitação, não só pela sua complexidade, mas por ter sido considerado, à época, uma afronta à forma de fazer arte. Ainda assim, parece ter sido das primeiras tentativas para automatizar a construção de modelos tridimensionais.



Figura 2.9 – Técnica de Foto-escultura. Sequencia fotográfica, que posteriormente serviria para a produção do modelo físico, 1865 (esquerda); Escultura inacabada, em madeira, produzido por este método, 1865 (direita).

A partir da segunda metade século XX, vários processos foram testados e patenteados, ainda que nenhum tenha sido comercializado ou obtido resultados significativos até à descoberta da *Estereolitografia*, em meados dos anos 80. Essas experiências passavam pela utilização de líquido de revelação fotográfico (Munz 1951), plástico fotossensível (Swainson 1971), e materiais unidos por fundição (Ciroud 1972). Já com alguns resultados práticos, Housholder apresentou, em 1979, a primeira descrição do que viria a ser a técnica de *Sinterização Selectiva por Laser* (SLS), onde aplicava camadas finas de material, solidificando-as através de uma fonte de calor controlada. Estas camadas, em betão, eram separadas por uma grelha que permitia dar forma ao objeto (Housholder 1979; Bourell et al. 2009). Herbert, da empresa 3M Graphic Technologies Sector, publicou o artigo *Solid Object Generation* em 1979, no qual descreve um sistema de 3 eixos que controlava, por meio de um computador, um espelho a direcionar um feixe de laser UV sobre uma camada de polímero. Esta experiência conseguiu produzir

pequenos objetos com formas básicas (Wohlers 2005; Bourell et al. 2009). Em 1981, Hideo Kodama do Nagoya Municipal Industrial Research Institute, publicou o resultado da sua pesquisa no artigo *Automatic Method for Fabricating a Three-Dimensional Plastic Model with PhotoHardening Polymer*, sobre um sistema de prototipagem que utilizava polímeros sensíveis à luz UV, numa abordagem de camada sobre camada. Podemos ver esta experiência como a primeira abordagem funcional do sistema de *Estereolitografia* (Wohlers 2005; Bourell et al. 2009).

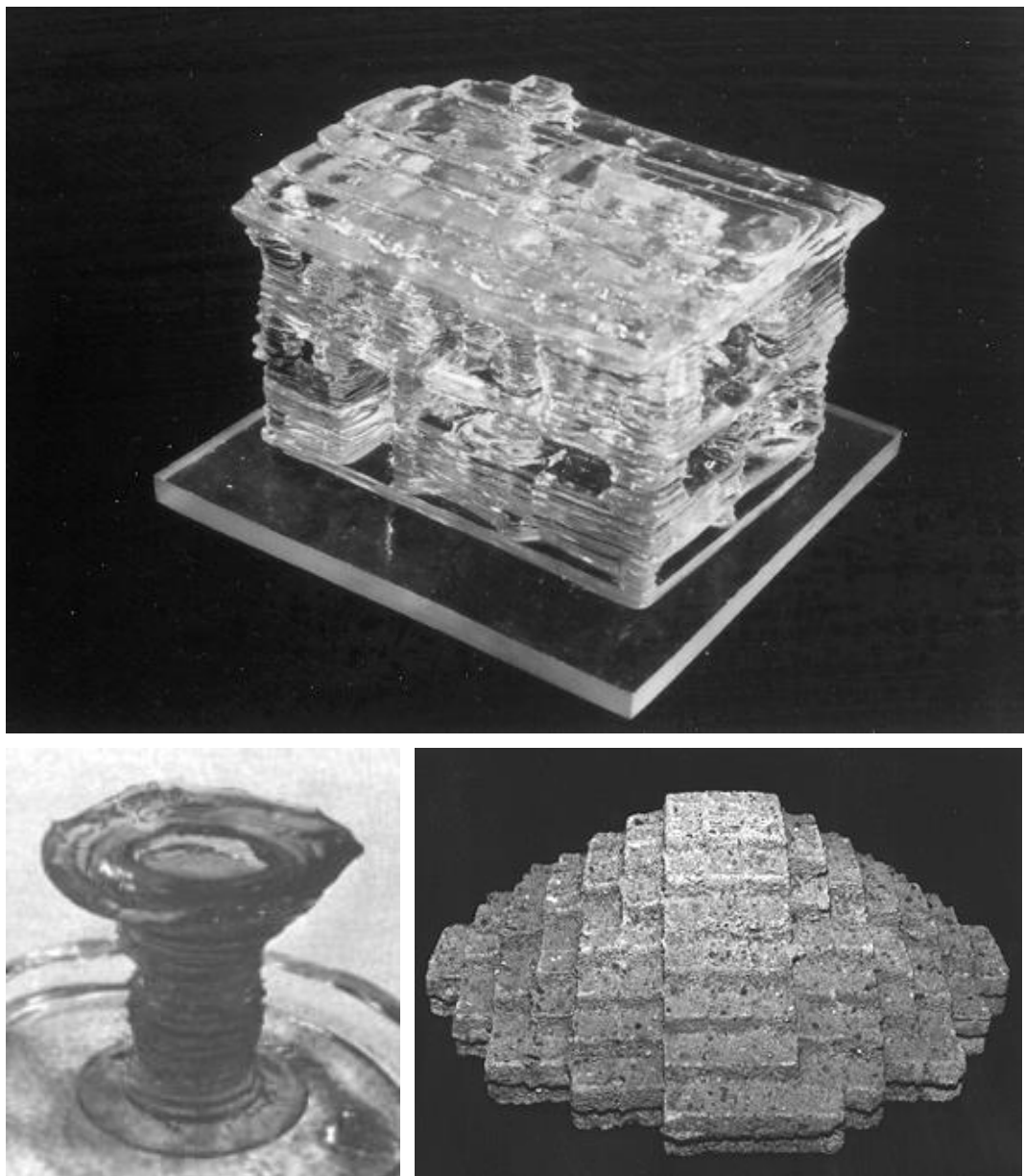


Figura 2.10 - Objetos produzidos pelos sistemas de: Kodama (imagem superior); Herbert (esquerda); Housholder (direita).

Surgimento da Fabricação Aditiva

Seguindo as experiências descritas anteriormente, Charles Hull, em meados de 1980, experimentava a exposição de lasers de *scanner* em materiais sensíveis à radiação ultravioleta, descobrindo, assim, que certos polímeros se tornavam sólidos e que, solidificando-os sequencialmente, conseguiria produzir objetos físicos (Gibson et. al 2015). Três anos mais tarde, Charles Hull, considerado o pioneiro da FA, inventou o sistema de *Estereolitografia* (SLA), que permitia a criação de objetos a partir de informação digital, patenteando-o com o nome *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* (Hull 1984). Em 1992, depois de ter fundado a empresa 3D Systems Corporation, que ainda hoje é uma das maiores no ramo, Charles Hull criou aquela que foi a primeira máquina de FA na altura, a *Stereolithographic Apparatus*, a *SLA-1*, seguindo-se a *SLA-250* [Figura 2.11].



Figura 2.11 – Primeiro sistema de FA, desenvolvido por Charles Hull (em cima). Primeira máquina de FA da 3D Systems, SLA-1, 1992 (em baixo).

Os anos seguintes foram bastante ricos no desenvolvimento de novas técnicas de FA, sendo que grande parte destes sistemas, juntamente com a *Estereolitografia*, são a base tecnológica até os dias de hoje. Em 1988, na University of Texas, Carl Deckard desenvolveu e patenteou a tecnologia *Selective Laser Sintering* (SLS) que, em vez de um líquido, funde camadas de pó. A primeira máquina de SLS foi construída em 1992, pela empresa DTM¹. Também em 1988, foi inventada, por Scott Crump, a técnica de *Fused Deposition Modeling* (FDM). Três anos depois, surgiu a primeira máquina de *Laminated Object Manufacturing* (LOM) por Helisys e, em 1993, a *3 Dimensional Printing Techniques* (3DP) por Ely Sachs e Mike Cima do Massachusetts Institute of Technology (Dolhan, 2013). Em 2000, foi lançada a primeira impressora multicolor pela empresa Z Corp e, no ano seguinte, foi comercializada a primeira impressora de secretária pela empresa Solidimension (Wohlers 2014).

Democratização

Desde o seu surgimento, e durante algum tempo, as máquinas de FA estavam apenas disponíveis para uso industrial e profissional, sobretudo devido ao seu elevado custo. Desde então, esta tecnologia tem vindo a maturar e está a passar por um processo idêntico ao do computador pessoal na década de 70. Através de algumas máquinas, a tecnologia está a tornar-se acessível ao público, a pequenas empresas ou instituições educativas, graças ao desenvolvimento de tecnologia mais barata e à simplificação da sua utilização, quer nas ferramentas digitais, quer nas próprias máquinas. Estes fatores permitem que, na maioria dos sistemas disponíveis ao público, seja utilizado o método de extrusão de plástico, embora tenham também surgido sistemas de solidificação de fotopolímeros ou de laminação a preços mais acessíveis.

O primeiro sinal da democratização da FA foi o projeto *Reprap*, fundado em 2005 por Adrian Bower da University of Bath². O projeto consiste numa comunidade de entusiastas que desenvolve e divulga vários tipos de máquinas baseadas nas tecnologias existentes, maioritariamente por extrusão de plástico. Estes novos mecanismos de fabricação são colocados na plataforma *online*, assim como todas as especificações, detalhes para construção e ficheiros digitais de peças para serem fabricados, gerando-se o conceito das máquinas auto-replicáveis. Um contraste com o que vinha a ser feito pela indústria, que protege a tecnologia com patentes. A primeira máquina - *The Reprap Darwin*, foi concluída em 2007 [Figura 2.12] (Jones et al. 2011). A partir de uma filosofia *faça você mesmo*, tornou-se possível qualquer pessoa

¹ A história da tecnologia de SLS, pode ser consultada no site da The University of Texas at Austin - Mechanical Engineering: <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry>

² O projeto *RepRap*, pode ser visto em: <http://reprap.org>

interessada construir a sua própria máquina de FA de raiz. Por outro lado, derivado do projeto *Reprap*, ocorreu um segundo fenómeno baseado no surgimento de linhas de máquinas *open-source* com nome de autor, como é o caso da *Prusa*³. Esta tornou-se de tal forma popular que é capaz de rivalizar com grandes empresas, no que respeita ao desenvolvimento e à comercialização. Este tipo de máquinas serve a quem pretende tecnologia *open-source* a preço reduzido, mas que não quer ou não tem o conhecimento necessário para montá-las.

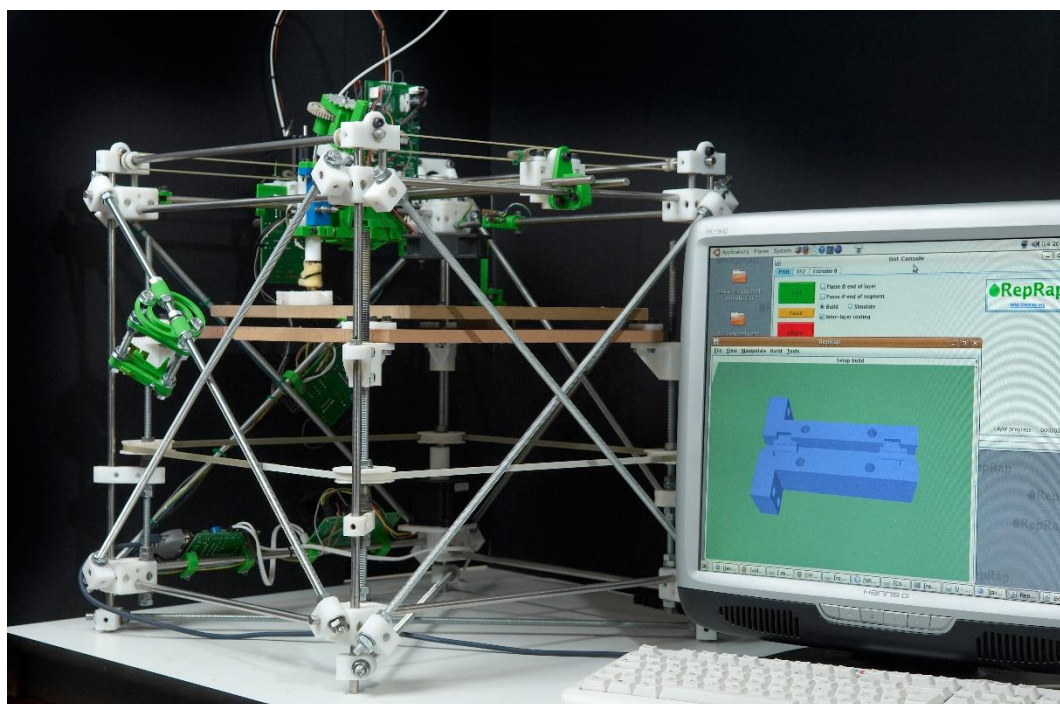


Figura 2.12 – The Reprap Darwin, a primeira máquina de código aberto e cuja grande parte das suas peças são produzidas por máquinas de FA, criando um ciclo de replicação.

Por outro lado, a democratização não se vê apenas nas máquinas, mas também no surgimento de projetos de prestação de serviços digitais, tais como: a Shapeways⁴, uma plataforma *online* de comércio de produtos produzidos por FA criada em 2008, entre designers e consumidores; a Sculpteo⁵, uma plataforma *online* fundada em 2009, que disponibiliza serviços de fabricação, facilitando assim o acesso à tecnologia; ou a Thingiverse⁶, uma rede social que partilha de modelos STL para produção em FA que foi criada em 2008.

³ O projeto Prusa pode ser consultado em: <https://shop.prusa3d.com>

⁴ A plataforma Shapeways pode ser consultada em: <https://www.shapeways.com>

⁵ A plataforma Sculpteo pode ser consultada em: <https://www.sculpteo.com>

⁶ A comunidade Thingiverse pode ser consultada em: <https://www.thingiverse.com/>

2.1.3 Processos

Existe uma grande variedade de técnicas de Fabricação Aditiva executadas por diferentes tipos de máquinas. Desta forma, devido ao crescente número de processos, estes são separados por categorias. Para tal, foram utilizadas diversas formas de classificação dos processos, quer pelo estado do material e pela *técnica de construção de formas* (Kruth et. al 1998) ou, noutra abordagem, pelo estado inicial do material utilizado: sólido, líquido, partículas discretas e laminação (Pham e Gault 1998, Hopkinson et al. 2006). Contudo, estas classificações parecem não ser totalmente esclarecedoras, sobretudo com os avanços tecnológicos dos últimos anos.

A abordagem utilizada para descrever os processos, neste subcapítulo, é aquela que tem vindo a ser recorrente nos últimos anos e estandardizada pela ISO/ASTM. Baseada na categorização de Stucker e Janaki Ram (2007), as tecnologias são separadas por grupos de processos que utilizam o mesmo tipo de máquinas/métodos e os mesmos sistemas de transformação de materiais. De acordo com Gibson et. al (2015) e ISO/ASTM (2015), esta classificação divide-se em sete categorias: *Vat photopolymerization*, *Powder bed fusion*, *Binder jetting*, *Material extrusion*, *Material jetting*, *Sheet lamination* e *Directed energy deposition*.

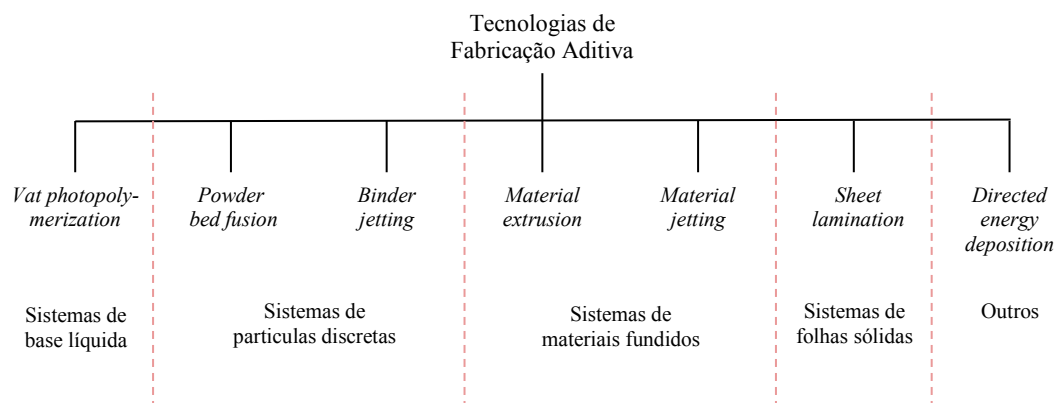


Figura 1.13 – Esquema das técnicas existentes, com base na categorização da ISSO-ASTM e no estado base dos materiais, classificados por Pham e Gault.

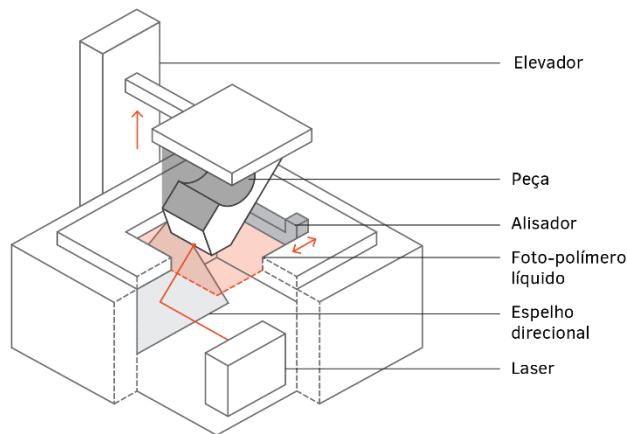


Figura 2.14 - Esquema de funcionamento e composição de uma máquina de Vat Photopolymerization.

Vat Photopolymerization

Consiste em processos que utilizam líquido foto-polimerizável contido num tanque e processado seletivamente por incisão de energia a cada secção (ISO/ ASTM 2015). Numa cuba é contida uma resina foto-polímera líquida, que é curada através da exposição seletiva por luz (laser ou projetada) e que, por meio de uma reação química, converte as áreas expostas em partes sólidas. Esta técnica tem como pontos fortes o elevado nível de precisão e resolução, permitindo geometrias bastante complexas, incluindo interiores programáveis, acabamentos lisos praticamente finais e permite áreas de construção com dimensões significativas. Tem a capacidade de produzir modelos parcialmente ocos, possibilitando a redução de material utilizado. Por sua vez, as suas desvantagens estão associadas ao elevado custo das matérias-primas, à necessidade de pós-cura, e de estrutura de suporte para os modelos (Relvas 2002; Alves et al. 2001; Gibson et. al 2015). Os materiais frequentemente utilizados são as resinas foto-polímeras, sensíveis aos ultravioletas. Neste grupo enquadram-se as técnicas de FA, designadamente a *Estereolitografia* (SLA), que foi a primeira a desenvolver este método.

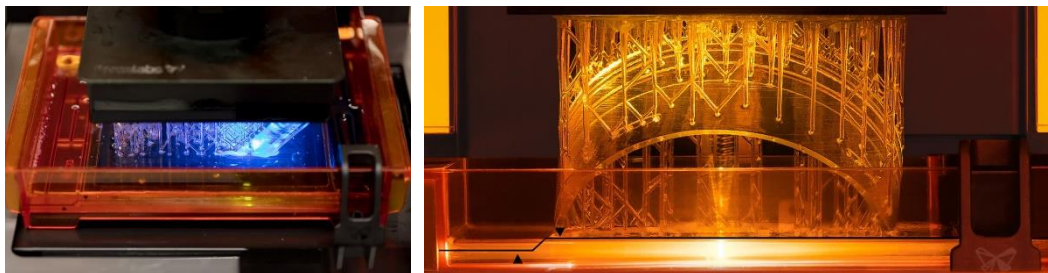


Figura 2.15 – Funcionamento de uma máquina de Vat Photopolymerization. Em azul é visível a luz UV que solidifica o material (esquerda). O objeto a emergir do líquido fotopolímero (direita).

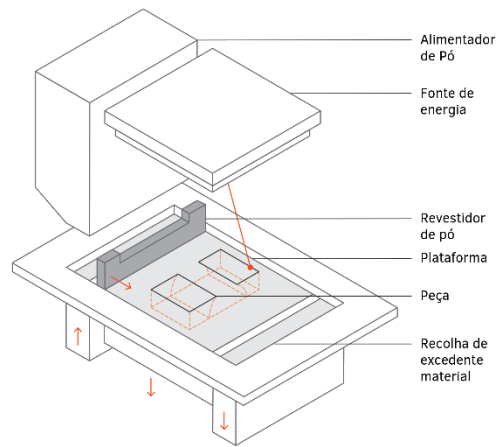


Figura 2.16 - Esquema de funcionamento e composição de uma máquina de Powder Bed Fusion.

Powder Bed Fusion

São processos que utilizam camadas de pó contidas num recipiente, seletivamente curadas com recurso a uma fonte de energia térmica, mais concretamente feixes ou lasers (ISO/ ASTM 2015). As máquinas desta técnica têm que conter mecanismos para a emissão de energia, não só para o controlo seletivo, mas também para adicionar o material base e nivelá-lo (Gibson et al 2015). O restante material (pó não solidificado) é utilizado como suporte da restante construção. Estas técnicas têm como características positivas o facto de se poder obter geometrias complexas, com elevada precisão, sem carecer de suportes para a fabricação do modelo, além da grande quantidade de materiais que podem ser utilizados. Os materiais variam consoante as diferentes técnicas, tendo como possibilidades a cera, o *nylon*, o policarbonato, o PVC, os compostos cerâmicos e metálicos ou as areias (Relvas 2002; Alves et al. 2001). A técnica originária e mais conhecida é a *Sinterização Seletiva por Laser* (SLS).

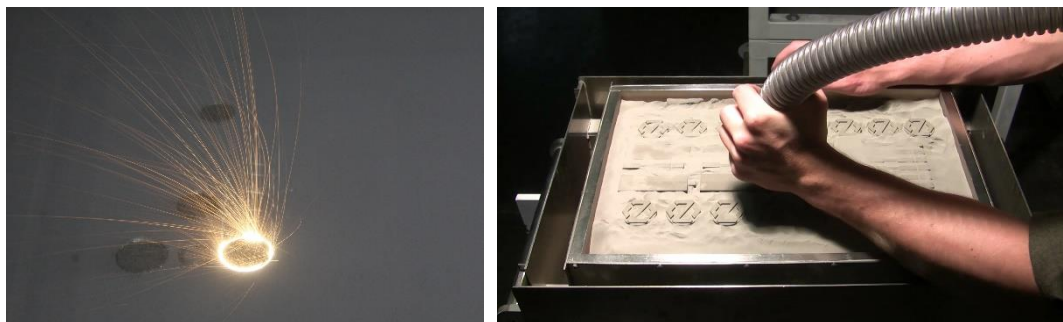


Figura 2.17 – Funcionamento das máquinas de Powder Bed Fusion. A fusão do material por laser (esquerda); Processo de pós-processamento, com a remoção do material excedente (direita).

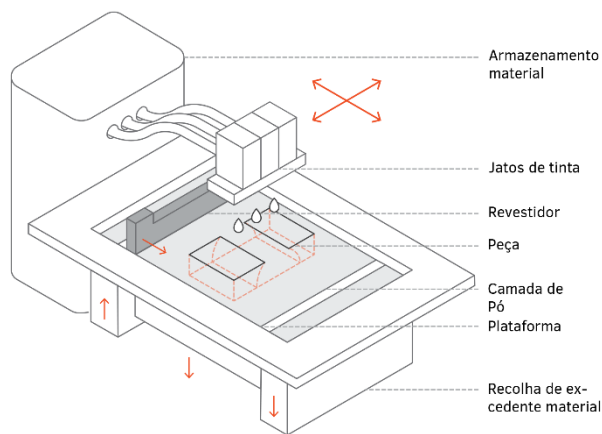


Figura 2.18 - Esquema de funcionamento e composição de uma máquina de Binder Jetting.

Binder Jetting

Tratam-se de processos em que um aglutinante líquido é depositado para unir materiais em pó (ISO/ ASTM 2015). Após cada camada impressa, a cama de pó baixa e uma nova camada é espalhada por cima, normalmente por um mecanismo cilíndrico similar aos processos de *Powder Bed Fusion*. Este processo é repetido até o objeto estar completo. Os aglutinadores utilizados podem ser orgânicos ou não orgânicos e químicos. Estas técnicas permitem não só a criação de objetos coloridos, mas também a obtenção de elevados níveis de produção, além de poder ser utilizada uma grande variedade de materiais. O pó não solidificado também age como suporte estrutural da construção. Permite a criação de peças parcialmente ocas e de juntas funcionais, como, por exemplo, uma dobradiça. Os materiais mais utilizados são o plástico, o metal, as cerâmicas ou a areia. A primeira tecnologia a surgir foi a *Impressão Tridimensional (3DP)* (Alves et al. 2001).

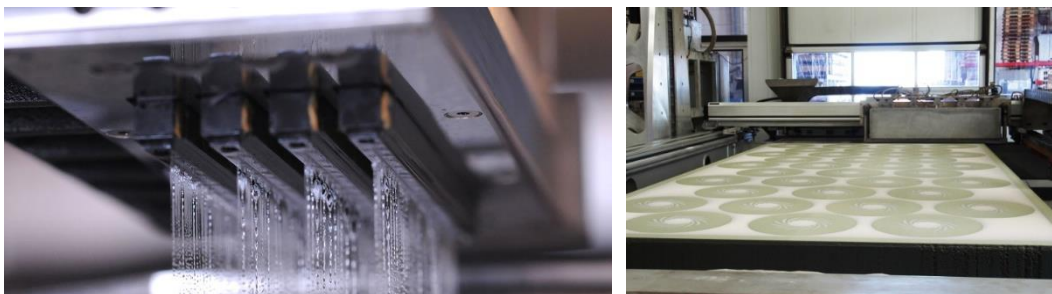


Figura 2.19 – Funcionamento de uma máquina do tipo Binder Jetting. Esta tecnologia deposita um aglutinante através de jatos (esquerda) sobre uma cama de pó (direita).

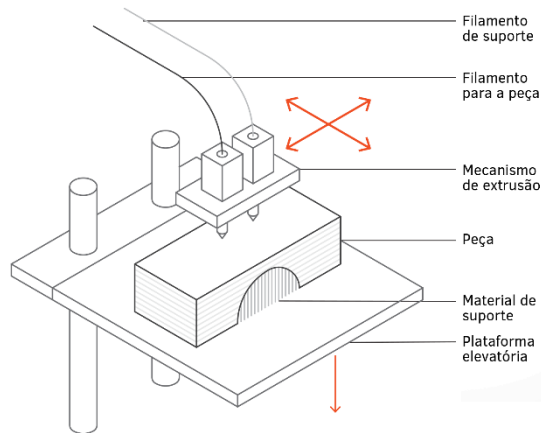


Figura 2.20 - Esquema de funcionamento e composição de uma máquina de Material Extrusion.

Material Extrusion

Decorre de processos que depositam seletivamente material por extrusão, através de uma micro-fieira, camada sobre camada (ISO/ ASTM 2015). O material é forçado a ser expelido por uma micro-fieira ou por um orifício quando é exercida pressão, sobrepondo-se em camadas múltiplas produzidas sequencialmente. Se a pressão se mantiver constante, tal como a velocidade, é possível manter um fluxo contínuo, em que o diâmetro do material é inalterado à medida que é depositado. O material, na sua extrusão, deve apresentar-se num estado semissólido e, quando depositado, deve solidificar, mantendo a sua forma, na maioria dos casos, à temperatura ambiente (Gibson et. al 2015). Estes métodos têm como grande vantagem o facto de haver soluções económicas. Além disso, permitem a construção de componentes funcionais, a utilização de mais do que um material ou cor na mesma fabricação e uma boa resistência estrutural dos objetos produzidos. Nos últimos anos, o número de variações desta tecnologia aumentou significativamente, em virtude da expiração da patente e consequente decréscimo do custo das máquinas, de tal forma que se tornou na primeira tecnologia acessível ao consumidor comum (Gibson et. al 2015). Porém, esta técnica necessita de suportes para vãos e balanços, acrescido do facto de o processo estar ainda sujeito a distorções imprevisíveis. Os materiais utilizados são essencialmente filamentos termoplásticos ou pastas quando aplicado um sistema com seringas. A principal técnica é a *Modelação por Extrusão de Plástico* (FDM), criada pela empresa Stratsys. Este tipo de tecnologia pode ser visto nas imagens apresentadas no capítulo 2.1. [Figura 2.2 e da Figura 2.5 à Figura 2.7].

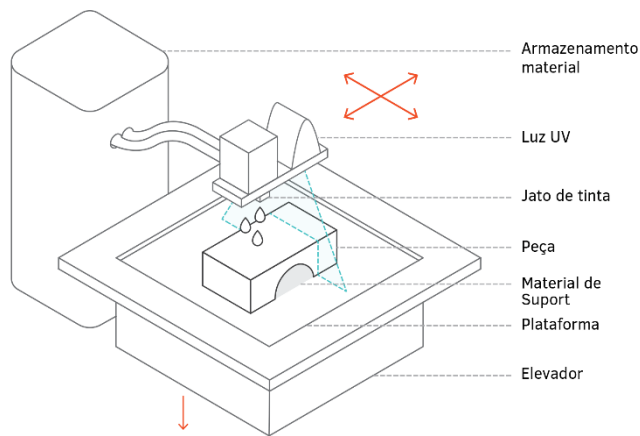


Figura 2.21 - Esquema de funcionamento e composição de uma máquina de Material Jetting.

Material Jetting

Traduz-se em processos que utilizam jatos de deposição (ISO/ ASTM 2015) isto é, pequenas gotas de material são depositadas por um sistema do tipo jato de tinta, curadas imediatamente após a deposição numa base elevatória. (Barclift e Williams 2012). As técnicas mais comuns utilizam a deposição de resinas fotossensíveis, que são solidificadas com luz ultravioleta ou por temperatura. Estes processos contam com centenas de jatos de deposição, tornando o processo bastante rápido, ao mesmo tempo que possibilitam um elevado nível de precisão, permitem a criação de peças coloridas ou utilização de múltiplos materiais e tem poucas necessidades de pós-processamento (Alves et al. 2001). Os materiais comuns são os polímeros e foto-polímeros, assim como as ceras. As técnicas mais conhecidas são a *Polyjet*, desenvolvida pela empresa Israelita Objet Geometries, que utiliza resina foto-polimerizável (Barclift e Williams 2012), ou a *Ther Mojojet*, da empresa 3D Systems, desenvolvida em 1999, que utiliza cera termoplástica (Alves et al. 2001).

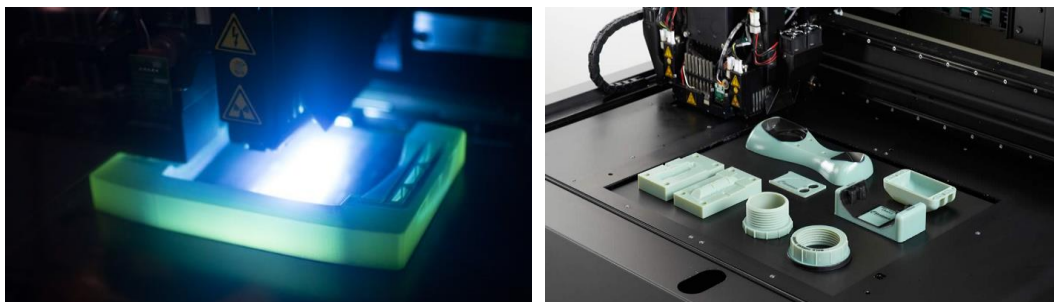


Figura 2.22 – Funcionamento de uma máquina do tipo Material Jetting. Esta técnica deposita gotículas de material solidificadas por luz UV (esquerda); e tem a capacidade de produzir objetos com mais do que uma cor (direita).

Sheet Lamination

Baseia-se em processos cujas folhas de material são depositadas à vez e unidas para criar o objeto (ISO/ ASTM 2015). As folhas de material são aglomeradas, coladas em camadas sucessivas e cortadas nos contornos do modelo. O processo de laminação pode ser através de adesivos ou químicos para papel e plásticos, ou por soldagem, no caso do metal. Estas técnicas permitem construções de grandes dimensões, têm uma boa definição de superfície, possibilita a utilização de materiais baratos e de processos que permitem a combinação com impressão a tinta para obter objetos coloridos. Por outro lado, a estabilidade dos objetos é limitada pela ligação entre as suas camadas e pelo comportamento do material sobre certos fatores externos, como, por exemplo, a humidade. Além disso, partes ocas não podem ser construídas (Relvas 2002; Alves et al. 2001). Os materiais mais utilizados são o papel, placas de plástico e folhas de metal. Foi um dos primeiros processos comercializados, em 1991, pela técnica que, à data, era denominada por *Fabricação de Objetos por Camadas* (LOM) (Alves et al. 2001).

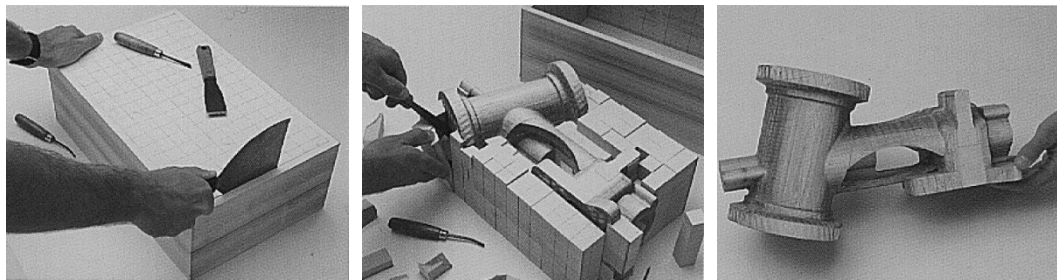


Figura 2.23 – Sequência do pós-processamento de um objeto construído pela tecnologia do tipo Sheet Lamination. É possível ver a forma como este material corta o material, como é também visível as linhas, na peça, das sucessivas folhas de material.

Directed Energy Deposition

São processos que fornecem energia térmica para fundir os materiais simultaneamente, à medida que estão a ser depositados (ISO/ ASTM 2015). O pó ou um fio de material vai sendo seletivamente alimentado ao objeto para dar forma à superfície desejada e é aderido ou fundido através de uma fonte de energia, quer seja um laser ou um feixe de eletrões. Em teoria, é basicamente um sistema automatizado de construção por soldagem. As vantagens deste método passam pela possibilidade de utilizar um sistema com mais de 3 eixos, sendo este o único sistema capaz de depositar material livremente. É ainda eficaz em reparações de objetos já existentes e pode construir com vários materiais, sobretudo fios ou pós-metálicos e cerâmica (Gibson et. al 2015).



Figura 2.24 – Técnica de Directed Energy Deposition. O material é projetado à distância e solidificado instantaneamente pela emissão simultânea de energia.

2.2. Características

Explicado o funcionamento da Fabricação Aditiva, assim como as diferentes técnicas existentes, já é possível imaginar e compreender algumas das vantagens na sua utilização, quando comparada com outros métodos de fabricação. A sua versatilidade, pela deposição seletiva de material de forma sequencial, permite atribuir novas características aos objetos produzidos, dificilmente ou até mesmo impossíveis de alcançar de outra forma. Assim, a sua caracterização irá ser feita pela demonstração de diferentes finalidades, pelas novas capacidades de desenho possíveis de atribuir aos objetos construídos e pelas transformações e controlo do material. Estas características serão ilustradas com alguns exemplos de aplicação, de forma a demonstrar também a introdução e o impacto que a FA está a ter nas mais variadas áreas.

2.2.1. Finalidades

Com recurso à FA, e através de uma única máquina, é possível produzir objetos nas mais diversas áreas, entre as quais a medicina, a aeronáutica, o ramo automóvel e o *design*. Por outro lado, é possível compreender que, numa única área, esta tecnologia pode abranger vários tipos de aplicação, como protótipos, moldes, ferramentas ou produtos finais. Por exemplo, como demonstra Gibson et. al (2015), no caso da medicina, essas aplicações traduzem-se na produção de objetos para uso em diagnóstico e preparação cirúrgica, na fabricação de próteses, no desenvolvimento de produtos ou na engenharia de tecidos e fabricação biológica.

Prototipagem

Inicialmente, estas tecnologias foram adotadas por algumas empresas industriais para a produção de protótipos. Devido à sua precisão e facilidade em construir objetos distintos, este método revelou vários benefícios para a verificação do desenho de um produto, permitindo uma visualização mais precisa do que viria a ser o resultado final e, consequentemente, reduzindo o tempo do processo de desenho. Estas vantagens culminariam, assim, numa diminuição dos custos, quer pelo tempo, quer pela prevenção de erros, evitando correções depois dos produtos estarem no mercado. Uma abordagem completamente distinta é, por exemplo, a utilização de modelos de visualização de órgãos humanos para diagnóstico ou preparação de cirurgias, permitindo aos

médicos um planeamento cirúrgico personalizado e aos pacientes uma melhor consciencialização da sua condição. A produção de modelos anatómicos foi investigada no Hospital da Universidade de Hebei, na China, onde construíram modelos de fígados, à escala real, com integração visual de tecidos e estruturas internas [Figura 2.25] (Goehrke 2017). Outro tipo de protótipos são os utilizados em testes funcionais, que servem não só para verificação do desenho, mas também para perceber determinados comportamentos, como, por exemplo, os testes aerodinâmicos em túnel de vento entre os quais o projeto +3, desenvolvido para a NASA, que testou a viabilidade de uma asa fixa⁷ [Figura 2.25].

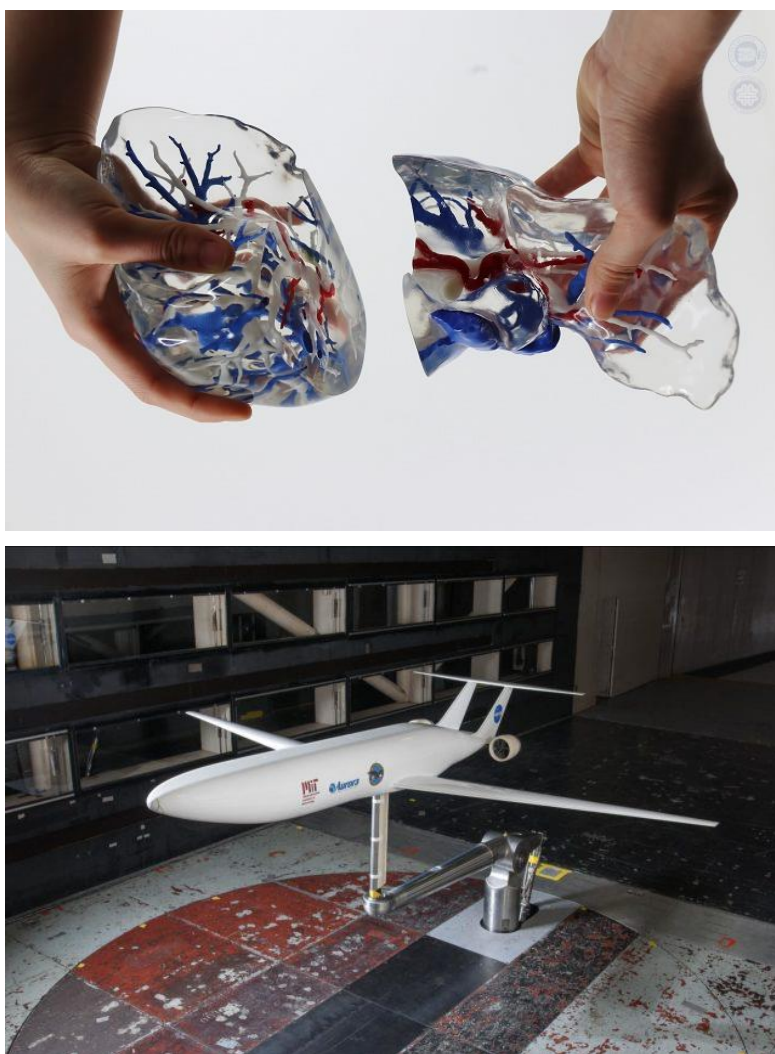


Figura 2.25 – Protótipos. Modelo de visualização de um fígado, desenvolvido no Hospital da Universidade de Hebei, 2017 (em cima); Projeto “+3”, desenvolvido pela NASA, em teste num túnel de vento (em baixo).

⁷ Este projeto pode ser visto na página da empresa que produziu o protótipo, a Stratasys: <https://www.stratasydirect.com/resources/case-studies/fdm-nasa-n3-model-aurora-flight-sciences>

Moldes e ferramentas

As tecnologias FA podem também ter um impacto significativo nos processos de construção utilizados correntemente e funcionar como um complemento destes. Por exemplo, no trabalho metalúrgico ou nas técnicas de injeção por molde, a produção de moldes com o recurso à FA poderá, entre outros benefícios, baixar custos, facilitar geometrias complexas, reduzir a quantidade de peças necessárias na montagem de um produto, controlar espessuras e incorporar nos moldes reentrâncias, orifícios e componentes funcionais que normalmente só são possíveis com trabalho extra.

Uma das aplicações de apoio a processos industrializados de produção é a construção de moldes para processos convencionais de injeção por molde, em que a utilização desta tecnologia permite a introdução de câmaras de arrefecimento no interior do molde, chamadas de *conformal cooling*, de modo a tornar este processo de produção em massa ainda mais rápido [Figura 2.26] (Mayer 2009). Outra das aplicações na produção industrial, à qual a FA pode trazer novas vantagens, é a fabricação de ferramentas personalizadas para utilização na produção em série, demonstrado pelo exemplo da Volkswagen Autoeuropa em Portugal (de Vries 2017) e também da Opel (Wyman 2015a), onde foram adotadas máquinas de FA para facilitar a produção e modificação de algumas das ferramentas e peças consumíveis utilizadas na produção automóvel, podendo [Figura 2.27], inclusivamente, fazê-lo a qualquer momento e de acordo com as necessidades momentâneas de produção, obtendo, assim, uma grande redução de custos.



Figura 2.26 – Produção de moldes por processos de FA para utilização noutros processos de produção. Camaras de arrefecimento no interior do molde na produção de bolas de golfe.



Figura 2.27 – Ferramentas produzidas com recurso à FA na fábrica da Volkswagen Autoeuropa em Portugal

Produção de produtos finais

Ao contrário das aplicações anteriores, em que a FA servia para a produção de peças complementares, a tecnologia tem evoluído ao longo dos anos e a vários níveis, sobretudo ao nível da precisão, do comportamento mecânico das peças produzidas e do tempo de produção ou redução dos custos. De tal forma que, a partir de certo momento, se tenha começado a pensar na utilização da FA para a produção de produtos finais.

Janne Kyttanen foi das primeiras pessoas a comercializar produtos finais produzidos com tecnologia FA. Este “[...] imaginava um futuro em que os produtos iriam ser reduzidos a ficheiros digitais, e que a sua distribuição tornar-se-ia tão simples como descarregar música da internet”⁸. A marca e gabinete de *design* Freedom of Creation, criada por Kyttanen para o efeito, começou a desenvolver uma coleção de produtos, que iam desde a decoração de interiores à moda, sendo que o seu primeiro produto, e provavelmente o mais referenciado, foi o candeeiro em forma de pétalas [Figura 2.28]. Outro exemplo é o da empresa Local Motors que, em 2014, construiu o primeiro carro com recurso à FA, o *The Strati* [Figura 2.28]. Trata-se de um automóvel elétrico de dois lugares, em que o corpo foi produzido em poucas etapas, por uma tecnologia *Material Extrusion* à grande escala. Feito em plástico reforçado com fibra de carbono, este modelo demorou 44 horas a produzir, sendo composto por apenas 40 peças, o que representa uma grande redução quando comparado com as 20.000 dos modelos comerciais (Spears 2014). Este protótipo serviu de base para o método de produção industrial que Jay Rogers, o fundador da empresa, implementou no mais recente modelo de 2016, o *Otti*, um veículo autónomo e de utilidade pública. A Local Motors defende que, através da utilização de tecnologias de fabricação direta como a FA, “têm a capacidade de produzir peças diretamente de ficheiros CAD; eliminar investimento em ferramentas; reduzir o tempo entre desenho e produção e melhor que tudo, elimina penalizações de redesenhar - desbloqueando a customização em massa, anteriormente impossível de alcançar”⁹. Esta empresa aposta ainda numa abordagem de produção assente em micro-fábricas que podem estar espalhadas pelo território, aproximando a produção ao mercado e diminuindo a necessidade de armazenamento.

⁸ A citação foi retirada da bibliografia publicada na página da internet de Janne Kyttanen, disponível em: <https://www.jannekyttanen.com/biography/>

⁹ A citação foi retirada da bibliografia publicada na página da empresa Local Motors, disponível em: <https://localmotors.com/company/>



Figura 2.28 – Produtos finais para comercialização. O candeeiro “Lily light” de Janne Kytanen, 2000 (em cima); Carro produzido por FA. O “Ottie” da Local Motors, 2016 (em baixo).

Fabricação pessoal

Para além da produção variável em série e da individualização e capacidade formal que caracterizam esta tecnologia, a FA abre novas possibilidades ao espaço de produção. Por exemplo, em vez de ser feita num local centralizado, designadamente uma fábrica, a produção pode passar diretamente para a loja, junto ao consumidor, dando-lhe, assim, a possibilidade de alterar o produto na hora. Num outro plano, e atendendo ao facto de estarmos perante uma democratização da máquina de FA, a produção pode mesmo vir a entrar dentro das casas dos consumidores, graças às plataformas de comércio *online*, que poderão permitir a comercialização não do produto final, do ficheiro digital para produção. A adoção deste tipo de estratégia pode contribuir inclusivamente para a eliminação certos passos logísticos, como o transporte, distribuição ou armazenamento, alterando, assim, o paradigma económico atual, como defende Anderson (2014), que tal disrupção seria tão grande, a ponto de se tornar na próxima revolução industrial.

Por exemplo, as máquinas fotográficas são objetos complexos e, na maioria dos casos, são um produto de consumo com elevado valor no mercado. É então possível encontrar *online* os ficheiros da modelação tridimensional para serem produzidos por tecnologias de FA “caseiras”, duas câmaras analógicas ou a *SLO*, criada pelo designer Amos Dudley¹⁰ [Figura 2.29]. Recentemente, a questão da partilha de desenhos *online* para produção de objetos por FA tem sido uma das questões de conflito político nos Estados Unidos, devido à discussão pela partilha de ficheiros para produção de armas. Este caso surge quando, em 2013, Cody Wilson consegue produzir uma arma funcional a partir desta tecnologia e publica *online* os ficheiros necessários para a sua produção caseira, os quais contaram com 400 mil transferências [Figura 2.29] (Louro 2018). Desde então, tem havido uma discussão pública entre quem defende o direito à propriedade e divulgação de informação em domínio público e quem defende que esta prática é um risco para a sociedade (Koslow 2018). Outro exemplo é o projeto *Enabling the Future*¹¹, uma comunidade que está a utilizar a FA de forma a poder disponibilizar próteses funcionais de mãos e braços para crianças [Figura 2.29]. Esta produção, feita por máquinas FA *desktop* e *open-source* e com materiais relativamente baratos, permitiu que próteses, habitualmente caras, fossem produzidas em qualquer lugar e fáceis de enviar para qualquer parte do mundo, sobretudo para pessoas residentes em países pouco desenvolvidos que, de outra forma, não teriam acesso às mesmas.

¹⁰ Os ficheiros para a produção da máquina fotográfica podem ser encontrados em: <https://pinshape.com/items/25871-3d-printed-slo-printed-lens-camera>

¹¹ O projeto *Enabling the Future*, pode ser consultado em: <http://enablingthefuture.org/>



Figura 2.29 - Objetos que podem ser fabricados por pessoas comuns. Máquina fotográfica SLO desenhada por Amos Dudley (em cima, esquerda); A “Liberator”, a primeira arma funcional para FA, desenvolvida por Cody Wilson em 2013 (em cima, direita); Próteses de membros superiores, produzidas no âmbito do projeto “Enabling the Future” (em baixo).

2.2.2. Desenho

Durante anos, os *designers* viram-se limitados a ajustar o desenho aos processos de produção. Nessa circunstância, e sem precisar de recorrer a moldes ou ferramentas auxiliares, a Fabricação Aditiva dá ao projeto a capacidade de se libertar de cuidados inerentes à produção, oferecendo, para além da liberdade formal, aquilo a que se pode chamar de liberdade produtiva. "*O desenho liberta-se de condicionantes e limites impostos por outras tecnologias de fabricação surgindo processos de desenho mais heterodoxos*" (Malé-Alemanly 2012: 18).

Liberdade geométrica

Sendo a FA um processo de construção por adição, a simplicidade resulta do método de deposição de uma camada bidimensional que, no plano horizontal, tem uma total liberdade geométrica que permite construir objetos de grande complexidade, ao passo que, no plano vertical, é junta com outras centenas ou milhares de camadas consequentes. Assim, o objeto é composto por um conjunto de secções transversais, cada uma delas possíveis de serem desenhadas, quer no perímetro exterior, quer no preenchimento interior. É indiferente, em termos de dificuldade, a construção de uma superfície plana ou de uma superfície livre. "[...] *Nunca alguma vez o homem esteve na situação onde a visualização e o desenho de um produto é verdadeiramente mais difícil que fazê-lo*" (Hopkinson et al. 2006: 2). De tal forma, que a complexidade de uma peça é virtualmente ilimitada, sendo condicionada essencialmente pela capacidade de desenho.

Uma das demonstrações da capacidade geométrica destas tecnologias é o caso do *Sketch Furniture*, que materializou desenhos à mão livre em peças de mobiliário [Figura 2.30]. O *atelier* de design sueco Front utilizou duas técnicas combinadas: a captação de movimentos no espaço, através de *Motion Capture*; e a materialização dos modelos digitais, recorrendo à tecnologia de FA, concretamente à *Estereolitografia*¹².

¹² Esta coleção de mobiliário pode ser vista na página na internet dos Front: <http://www.frontdesign.se/sketch-furniture-performance-design-project>



Figura 2.30 – “Sketch Furniture”, do Front, 2005. O processo de desenho espacial, através de tecnologias digitais de captação de movimento (em cima); Objetos finais, produzidos por SLA (em baixo).

Variação e Personalização

A customização pode ser descrita como o processo de pegar em algo genérico e fazê-lo específico para determinado contexto. Também é possível compreender que existem vários tipos de personalização, que poderá ir desde uma produção de raiz específica para um consumidor até à alteração de um produto *standard*. Estas abordagens variam no grau de intervenção, do bastante diferenciado para o menos diferenciado. A comercialização de artigos personalizados, produzidos através dos métodos convencionais, tende a ser pouco exequível, moroso e com custos elevados, sendo que, na maioria das vezes, são apresentados como artigos exclusivos. A personalização atual não está acessível ao mercado da produção em massa (Hopkinson et al. 2006). E é neste contexto que a FA tem a possibilidade de intervir, transportando as suas capacidades para a produção industrial, uma vez que permite ter objetos variados entre si numa mesma produção, rompendo, assim, com os métodos habituais em massa. Partindo de um desenho único, é possível recorrer às tecnologias de modelação digitais e programar um conjunto de parâmetros pré-definidos para alterar o desenho base. Ao público são disponibilizadas as ferramentas necessárias de redesenho, para que o consumidor altere o produto de modo a aproximá-lo dos seus gostos pessoais. A relação com o consumidor final poderá ser alterada a partir do momento em que este tenha o poder de intervir no desenho do produto, tornando-se inclusivamente parte do processo. Deste modo, estabelece-se uma nova dinâmica entre quem desenha, quem produz e quem compra (Hopkinson et al. 2006, Malé-Alemany, 2012).

Uma das primeiras experiências sobre o conceito de variação em série e a intervenção do consumidor no processo de desenho foi o projeto *Future Factories*, em 2002¹³. Este projeto desenvolveu um conceito em que um *website* permitiria observar a metamorfose aleatória de uma peça, onde o utilizador teria a possibilidade de parar o processo quando entendesse [Figura 2.31] (Atkinson et al. 2003). A empresa Nervous Systems, fundada em 2007 por Jessica Rosenkrantz e Jesse Louis-Rosenberg, dispõe, na sua plataforma *online*, de um conjunto de produtos, entre os quais acessórios de moda e candeeiros, onde o consumidor pode personalizar o produto, de acordo com alguns parâmetros disponíveis¹⁴ [Figura 2.31].

¹³ O projeto Future Factories pode ser visitado em: <http://www.futurefactories.com/>

¹⁴ A plataforma de personalização e de comércio da empresa Nervous Systems pode ser acedida em: <https://n-e-r-v-o-u-s.com/>

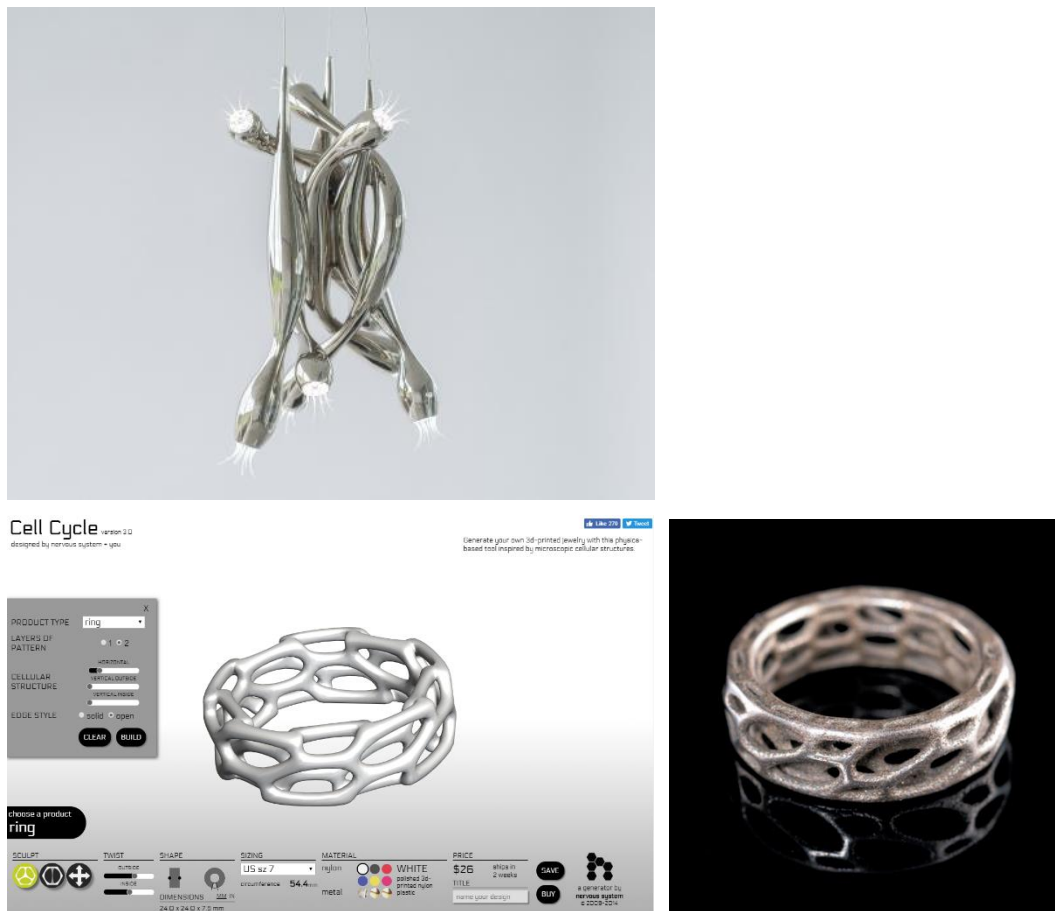


Figura 2.31 – Produção variável. Lâmpada “Tuber 9” de Lionel Dean, Future Factories, 2004 (em cima); Anel personalizável comercializado pela empresa Nervous Systems, em que na figura da esquerda é visível o modelo paramétrico, disponível online, no qual permite que o consumidor altere alguns parâmetros do desenho (em baixo).

Para lá da variação em massa, a FA pode gerar soluções específicas e personalizadas, criando, por exemplo, objetos a partir de dados físicos e morfológicos do utilizador. Neste caso, pode ser bastante útil na medicina, dado que cada corpo humano é irrepetível (Gibson et. al 2015). A customização em massa pode passar por peças que se adaptam à forma individual de cada corpo humano. Por exemplo, os auscultadores são um produto ao qual um tamanho serve a todos, conforme demonstrado pela FormLabs¹⁵, que adaptou a forma do auricular à medida do ouvido, oferecendo uma melhor experiência ao utilizador [Figura 2.32]. Na vertente médica, a partir do início dos anos 2000, temos o exemplo da empresa Sonova¹⁶, que adotou a tecnologia de FA para fabricar aparelhos auditivos específicos [Figura 2.32].

¹⁵ A aplicação da tecnologia desenvolvida pela FormLabs em auscultadores pode ser vista em: <https://formlabs.com/industries/audiology/>

¹⁶ Mais informação sobre a Sonova está disponível em: <https://www.sonova.com/en/features/3d-printing-technology-improved-hearing>

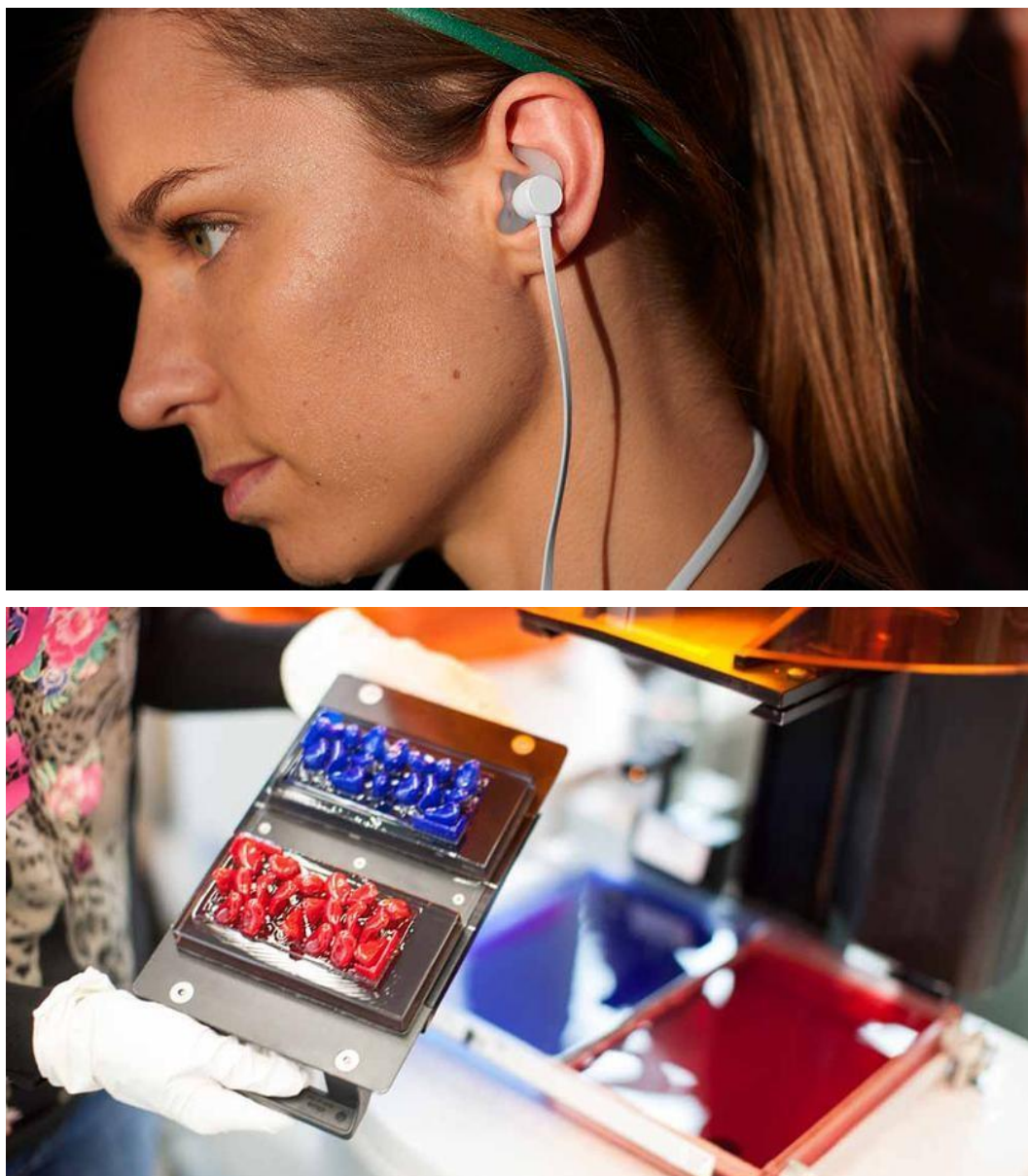


Figura 2.32 – Personalização. Auscultadores produzidos pela empresa FormLabs (em cima); Conjunto de peças personalizadas dos aparelhos auditivos, produzidos numa única vez com tecnologia de solidificação de resina, da empresa Sonova (em baixo).

Otimização topológica

A liberdade de desenho dada pela FA permite que um objeto seja otimizado para a função específica que irá desempenhar. Este procedimento costuma ser uma prática corrente no ramo da construção, no que respeita à projeção de pontes ou edifícios com grande complexidade estrutural. A otimização topológica passa por calcular as zonas de maiores esforços estruturais, adaptando a forma ao ótimo e ao exequível. Porém, com a FA, qualquer desenho é possível de construir, levando este conceito ao limite, de tal forma que "*o desenho se aproxima dos processos orgânicos naturais*" (Malé-Alemanly 2012: 37). Ao construir um objeto de raiz, depositando material ao invés de partir de uma peça em bruto, permite escolher onde este irá ser colocado e apenas onde é necessário. Desta forma, a FA é o único processo que permite criar estruturas internas hierarquizadas, como, por exemplo, treliças orgânicas que variam na sua dimensão. Este conceito parte de uma base de desenho celular e biológico, tendo como principal objetivo colocar o material apenas onde é necessário, tornando as peças parcialmente ocas, mas sem que fiquem estruturalmente fragilizadas. O desenho destas estruturas secundárias pode ser otimizado, não só para reduzir a massa das peças, mas também para, por exemplo, conseguir uma maior capacidade de absorção de energia ou melhorar o desempenho térmico ou acústico (Gibson et. al 2015).

Num outro contexto, foi utilizado um suporte de motor produzido por FA no avião comercial *Airbus A350 XWB*, com um desenho *biônico*, significativamente mais leve que as peças antecedentes produzidas por fresagem em alumínio [Figura 2.33] (Kellner 2017a). Por sua vez, a marca automóvel Bugatti pretende começar, já este ano, a produzir umas pinças de travão produzidos por FA, para instalação nos seus carros superdesportivos [Figura 2.33]. Estas serão as maiores peças do género produzidas num único componente, assim como a maior peça funcional em titânio produzida por esta tecnologia. Apesar de ser substancialmente maior que as suas homólogas, esta é 40% mais leve e permitirá uma travagem muito mais rápida¹⁷.

¹⁷ Mais informações sobre a pinça de travão da Bugatti está disponível em:
<https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/>



Figura 2.33 – Componentes otimizados. Suporte de um motor utilizado em aviões da Airbus, onde é possível ver a diferença entre a peça produzida por meios convencionais e a peça produzida por FA (em cima); Pinça de travões de automóvel desenvolvida pela empresa Bugatti (em baixo).

Redução de assemblagens e desenhos funcionais

A consolidação de partes irá permitir simplificar a construção de objetos complexos, que anteriormente eram compostos por várias partes, libertando muitos dos constrangimentos técnicos da fabricação. Articulações, dobradiças e partes constituintes podem passar a ser construídas de uma só vez. Esta característica permite reduzir o número de passos no processo de produção e eliminar grande parte das assemblagens e de trabalho manual, assim como os custos associados a estes. Esta é uma característica única da FA: a possibilidade de sair da máquina de fabricação um objeto totalmente funcional, pronto a utilizar (Hopkinson et al. 2006).

Os têxteis são um dos exemplos de peças com múltiplas assemblages. A proposta de utilização da FA para a produção de têxteis partiu da iniciativa de Jiri Evenhuis e de Janne Kytanen, no início dos anos 2000. Desenvolveram o conceito de produção de têxteis, através de cadeias de múltiplas peças circulares de pequenas dimensões, produzidas de uma forma integral [Figura 2.34]. Conseguiram aplicar estes têxteis em peças de vestuário, como vestidos ou malas¹⁸. No que concerne a peças com mecanismos funcionais, temos o exemplo do banco desdobrável *One_Shot*, desenhado por Patrick Jouin, que foi produzido de uma só vez, incluindo as dobradiças¹⁹ [Figura 2.34]. Na aviação, o exemplo do bocal de combustível, desenvolvido pela empresa General Electric, mostrou que, com recurso a esta tecnologia, conseguiu criar um componente mais eficiente produzido numa única peça, em vez das 20 peças necessárias quando geradas por métodos de produção convencional. Esta peça é atualmente utilizada nos motores a jato *LEAP* da CFM International, presente em alguns aviões da Airbus e da Boeing desde 2017, e que permitiu aumentar a eficiência de combustível em 15%, comparativamente ao motor anterior [Figura 2.34] (Kellner 2017b).

¹⁸ Alguns dos têxteis desenvolvidos podem ser encontrados nas páginas dos autores. Janne Kytanen: <https://www.jannekyttanen.com/>; Jiri Evenhuis: <http://jiri.nl/temp/>

¹⁹ Mais informação sobre o banco *One_Shot*, pode ser encontrado na página *online* dos trabalhos de Patrick Jouin, disponível em: <http://www.patrickjouin.com/en/projects/patrick-jouin-id/1326-oneshot.html>



Figura 2.34 – Redução de assemblagens. Cadeira “One_Shot”, desenhada por Patrick Jouin, 2006 (em cima); Pormenor do têxtil de Jiri Evenhuis e de Janne Kyttanen, onde é visível a interligação das peças circulares (em baixo, esquerda); Bocal de combustível desenvolvido pela General Electric (em baixo, direita).

2.2.3. Materiais

Desde há milhares de anos que a forma de transformação material se tem mantido quase inalterada. Os processos, mais ou menos tecnológicos, o princípio base da manipulação dos materiais tem-se cingido pelos mesmos métodos. A Fabricação Aditiva é, de facto, uma técnica sem precedentes, que poderá possibilitar novas capacidades materiais. O depósito seletivo de material permite controlá-lo praticamente em toda a peça, até à sua forma e função final.

Novas materialidades

Graças às capacidades únicas da FA, têm sido desenvolvidas novas formas de aplicação de materiais e novas materialidades, como é o caso da técnica desenvolvida pela Mediated Matter, grupo de investigação do MIT, que reinventou a fabricação de peças em vidro, abrindo portas a novas utilizações do material [Figura 2.35] (Klein et al. 2015), ou ainda, numa abordagem distinta, o projeto autossustentável *The Solar Sinter*, desenvolvido por Markus Kayser, que fabricou objetos de vidro a partir de areia do deserto, no próprio local [Figura 2.35]. A ideia passou por tirar o máximo partido dos recursos naturais do deserto, designadamente a abundância da matéria-prima e a utilização da energia solar, que, com a ajuda de uma lente, derretia a areia e dava, simultaneamente, energia aos sistemas elétricos (Etherington 2011).

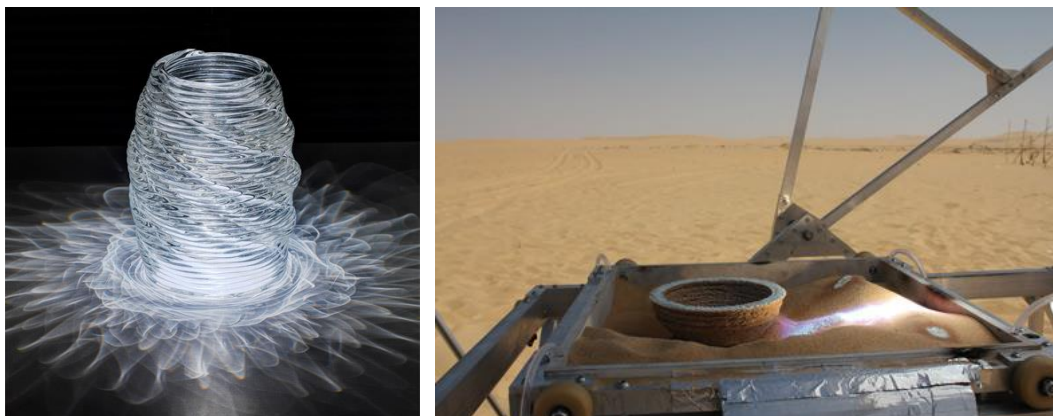


Figura 2.35 – Um vaso produzido em vidro, por deposição, desenvolvido pelo Mediated Matter (esquerda); O projeto “Solar Sister”, em que é visível a utilização dos recursos naturais para produzir objetos de vidro, através da fusão da areia (direita).

Complexidade material

O facto de o material ser trabalhado pontualmente nas técnicas de FA, dá a possibilidade de pensar e processar os materiais de uma forma diferente. *"A forma de fazer no domínio físico opera diferenciadamente do modo Natural. Desde os tempos antigos que a moldagem da matéria é constituída essencialmente por processos de assemblagem de componentes. Esses componentes materiais são tipicamente homogéneos nas suas propriedades sendo necessário serem montados com outros componentes de diferentes propriedades a fim de alcançar variações de comportamento físico"* (Oxman 2010: 275). Porém, contrariamente à utilização da FA, já se começa a testar a adição do material onde apenas é necessário na composição, podendo inclusive misturar materiais ou graduar consoante as diferentes propriedades e necessidades da composição. Por exemplo, uma única peça pode ser firme numa zona e flexível noutra (Gibson et. al 2015).

Materiais com Gradação Funcional (Functionally Graded Materials, FGM) é a designação dos materiais cujas propriedades variam gradualmente na sua composição. Na prática, este conceito tenta aplicar as propriedades físicas especificamente onde são necessárias (Hopkinson et al. 2006). Os materiais com funcionalidade gradual não é uma ideia nova. Foi utilizada pela primeira vez nos artigos *Gradients in composite materials* e *Gradients in polymeric materials*, em 1972, mas com maior ênfase na década de 80, no Japão (Koizumi 1997). Mas, o facto é que as características únicas da FA parecem ter a capacidade de facilitar este processo. *"Materiais gradientes claramente reservam um lugar importante no futuro da engenharia material e a habilidade [...] de os produzir usando a fabricação aditiva é incrivelmente prometedora, à medida que aumenta a estrutura do produto, a performance ambiental, melhorando a eficiência ambiental, promovendo a economia material e otimizando a distribuição material."* (Oxman 2010: 275). O trabalho desenvolvido por Neri Oxman e pelo Mediated Matter procura criar objetos adaptativos, através de métodos como a FA, onde a matéria também é desenhada. A *chaise-long Beast* é uma simbiose entre desenho e organização da matéria, estabilidade estrutural e conforto. Através de algoritmos, a cadeira foi desenhada com múltiplas células que variam em tamanho, opacidade, flexibilidade e rigidez, de acordo com as zonas de apoio do corpo [Figura 2.36]. Nos produtos de consumo, a marca desportiva Adidas explorou a distribuição do material na sola de umas sapatilhas de corrida, a *Futurecraft*. Com o objetivo de melhorar a performance, a estrutura na sola varia de densidade, criando zonas mais acolchoadas e zonas mais rígidas, de acordo com as necessidades de amortecimento ou de absorção de energia²⁰ [Figura 2.36].

²⁰ Mais informação sobre as *Futurecraft* pode ser vista em: <https://www.adidas.com/us/futurecraft>

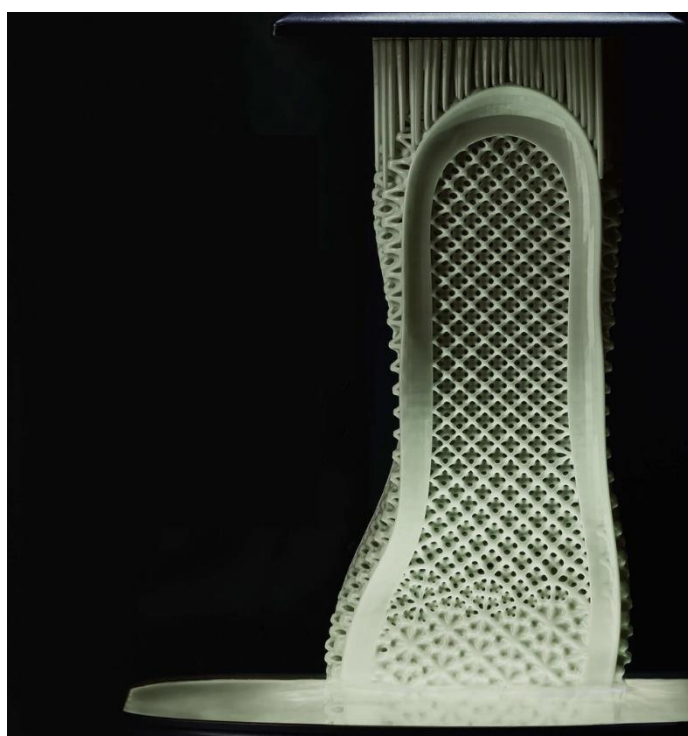
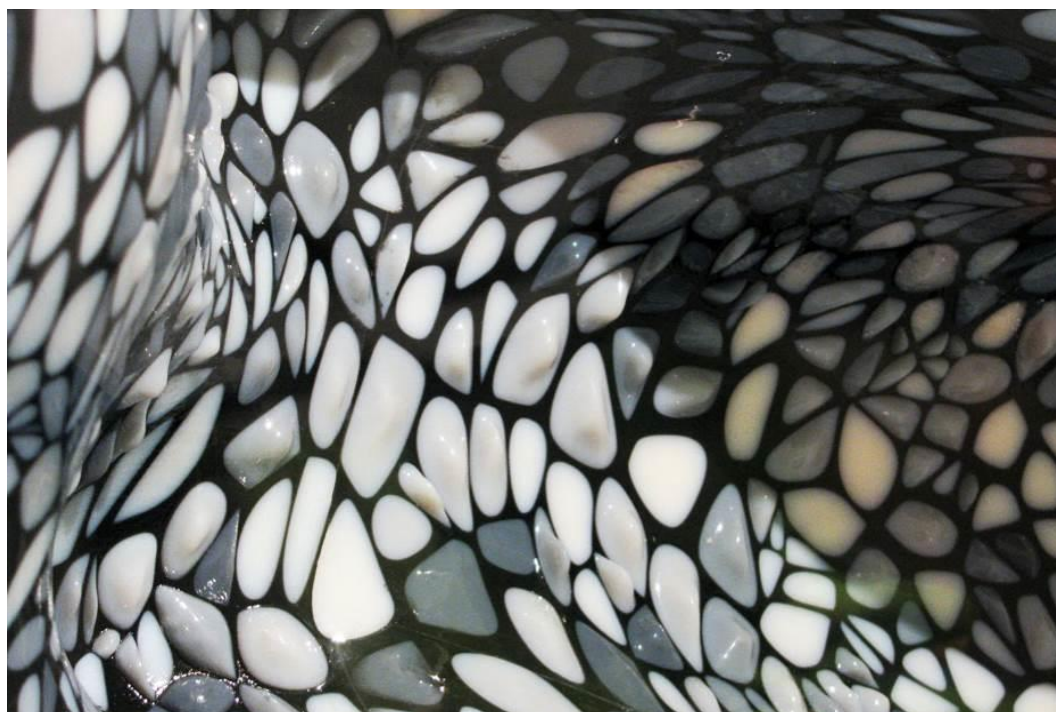


Figura 2.36 – Complexidade material. Pormenor da cadeira “Beast”, em que é visíveis as diferentes células que correspondem a uma distribuição funcional do material (em cima); A sola das sapatilhas da Adidas, onde torna-se perceptível a variação do padrão material (em baixo).

Materiais biológicos

A chamada *bioprinting*, FA com materiais biológicos, compatíveis com matéria biológica ou com células vivas, vem sendo explorada desde o final dos anos 90, tendo estas técnicas um grande potencial de aplicação na área da medicina. A fabricação de estruturas orgânicas, como órgãos para serem implantados em humanos, é uma das aplicações que demonstram a enorme complexidade desta área de estudo, e que dificilmente será alcançável sem o recurso às técnicas de FA. (Munoz-Abraham et al. 2016).

Até hoje, grandes passos foram dados para a concretização da fabricação de transplantáveis, em que a utilização da FA para produzir moldes de hidrogéis biocompatíveis, para servirem de suporte à deposição de células para o crescimento de tecidos, é cada vez mais recorrente. Esta técnica foi utilizada pela primeira vez em 1999, por cientistas da Wake Forest Institute for Regenerative Medicine, liderados por Anthony Atala, que perceberam o potencial da aplicação da FA, produzindo quando produziram o molde de uma bexiga humana e depois cobriram-na com células dos pacientes, diminuindo assim as hipóteses de rejeição do implante (Munoz-Abraham et al. 2016). Desde então, vários passos foram já dados nesse sentido e criados outros precursores da produção biológica, que vão desde estruturas mais simples, como ossos [Figura 2.37] (Daly et al. 2016) ou cartilagens, estruturas bidimensionais, como pele, ou tridimensionais, como a válvula aórtica e vasos sanguíneos, até órgãos, como o protótipo em escala reduzida de um rim [Figura 2.37] (Murphy e Atala 2014).

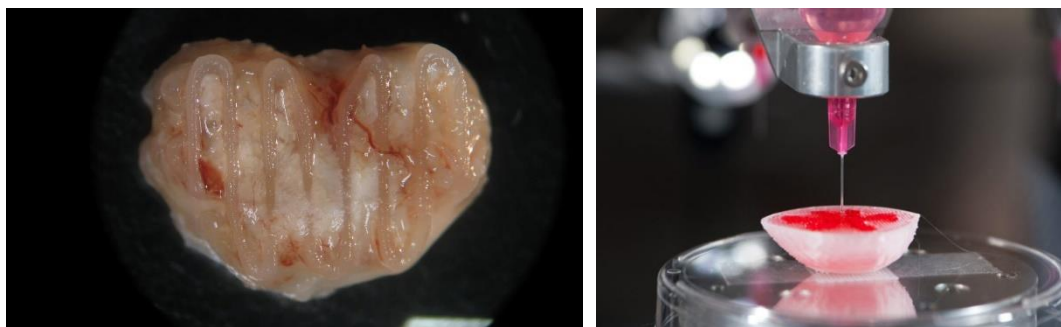


Figura 2.37 – Bioprinting de uma vértebra, desenvolvida por Daly et al. (2016), em que a estrutura é depositada por um hidrogel, por onde as células irão se desenvolver, até originarem cartilagem (esquerda); Protótipo de um rim, por onde de desenvolver as células dos pacientes, desenvolvido pela equipa de Anthony Atala (direita).

Capítulo 3

Assimilação

Após compreender os princípios genéricos da tecnologia, este capítulo irá divulgar a implementação da Fabricação Aditiva na prática da Arquitetura. Contrariamente aos exemplos da aplicação desta tecnologia noutras áreas, a disciplina da Arquitetura tem, em si, um conjunto de características que a tornam um caso singular em relação às demais. Desta forma, a Arquitetura apresenta dificuldades próprias para a aplicação da tecnologia, embora, por outro lado, abra igualmente um novo leque de oportunidades. Esta evolução permitiu que a aplicação de FA comesse a ser explorada à pequena escala, no início dos anos 90, e à grande escala, na viragem do milénio, pela imaginação de alguns entusiastas face à possibilidade de “imprimir” uma casa por inteiro, o que motivou a efervescência de novas técnicas e soluções.

Para compreender o processo de assimilação da FA na Arquitetura, este capítulo está dividido em duas partes: a primeira, onde são enumeradas as características intrínsecas da Arquitetura que maiores dificuldades criam à aplicação da tecnologia; e a segunda, onde é abordada a introdução da FA, através da enumeração histórica dos projetos pioneiros que abriram caminho à sua utilização em Arquitetura, desde a materialização de representações físicas em fases de projeto até aos primeiros passos na construção efetiva de edifícios.

3.1. Da Natureza da Arquitetura

Sendo diferente de outras disciplinas ligadas ao projeto, a Arquitetura tem uma natureza e características próprias, que motivam um interesse e condições particulares para a integração da Fabricação Aditiva nos seus processos. Sem pretender fazer uma comparação exaustiva de diferenças que são evidentes para qualquer pessoa, importa destacar alguns aspetos que ajudam a perceber as dificuldades e as potencialidades específicas destas tecnologias para a disciplina, bem como o rumo que a sua evolução está a tomar. Em seguida, destacam-se as questões da *escala* da Arquitetura, da *materialidade* e materiais utilizados para a construção, e do local da *construção* de um edifício.

Escala

Ao contrário de outras disciplinas, como o desenho industrial ou a moda, o produto final da Arquitetura tem uma escala radicalmente superior. A complexidade e a dimensão do edifício construído não podem ser comparadas com as de um móvel ou de um sapato.

A escala é um constrangimento para a integração da Fabricação Aditiva na Arquitetura, razão pela qual o interesse inicial se centrou na produção de maquetes de dimensões reduzidas ou cuja dimensão pudesse ser escalada, através da produção e consequente montagem de pequenas partes do objeto final. Estes modelos servem de complemento à maquete tradicional, especialmente em situações de maior complexidade geométrica e difíceis de reproduzir manualmente. Este facto deve-se, em grande parte, à condição contemporânea do estado de desenvolvimento tecnológico e, consequentemente, à dimensão que as máquinas tinham inicialmente. Conforme abordado no capítulo anterior, esta tecnologia foi utilizada essencialmente para a produção de protótipos de verificação de produto, sobretudo nas áreas da engenharia e da produção industrial que trabalham com componentes de pequenas dimensões. Nesta vertente, a aplicação da FA era bastante favorável em termos de tempo e de custos, pois permitia construir modelos físicos quase idênticos ao produto final futuramente comercializado. Contudo, dada a natureza das disciplinas, a grande diferença entre a Arquitetura e outras áreas industriais, como o desenho de produto, é que os modelos produzidos estão a uma escala reduzida, de 1/100 a 1/1000, enquanto que noutras disciplinas são produzidos modelos à escala real.

Mais tarde, com o desenvolvimento tecnológico surgiram novas técnicas de FA, que possibilitaram que estes processos começassem a ser escolhidos para a produção final, contrariamente à ideia até então estabelecida de que estas técnicas serviam essencialmente para a materialização de protótipos. Esta possibilidade foi demonstrada no capítulo anterior, não só através de vários exemplos de produção de pequenas séries, mas também de exemplos de produção variável em série. Consequentemente, a produção de produtos finais foi um processo evolutivo natural, em que, na maioria dos casos, não surtiu grandes alterações em relação aos processos já utilizados para prototipagem, uma vez que já eram produzidos modelos à escala real. Ora, o mesmo não acontece no caso da Arquitetura, onde existe uma diferença abrupta no que concerne à dimensão entre os modelos físicos produzidos numa fase de projeto e o objeto final, ou seja, o edifício. Daí o facto da construção uma habitação apresentar um grau de complexidade muito superior ao da produção de uma prótese, por exemplo. Este fator constitui, por isso, uma das principais dificuldades da utilização das tecnologias de FA na área da construção.

Apesar da construção de maquetes ser ainda a aplicação mais corrente na disciplina da Arquitetura, vários arquitetos, movidos pelas características interessantes dos processos aditivos, começaram a questionar a possibilidade de escalar a tecnologia para, à semelhança das outras disciplinas, produzirem peças finais diretamente por FA. A utilização destas tecnologias poderá servir para a construção de componentes (tijolos, moldes, moldes perdidos), elementos compostos (paredes, colunas, lajes) ou até mesmo edifícios por completo, como será descrito e analisado mais adiante, no capítulo 4. Deste modo, se pensarmos nos elementos que compõem um edifício, quer sejam componentes pré-fabricados, quer sejam construídos diretamente no local de obra, têm, na sua grande maioria, grandes dimensões. Para a utilização de um método como o da FA, e tal como acontece na produção de maquetes, a área de produção de uma máquina de FA tem de abranger pelo menos a dimensão do componente produzido e ter uma estrutura de movimento capaz de transportar a ferramenta de deposição em toda a sua extensão. Ora, é perceptível que tal máquina, necessariamente maior do que aquilo que produz, para satisfazer a realidade da Arquitetura terá dimensões muito grandes, à semelhança do que acontece atualmente com certos equipamentos usados em obra, como é o caso das gruas. Por estes motivos, e dada a impossibilidade de adaptar os processos de FA até então disponíveis no mercado, foi necessário aguardar até que surgissem máquinas específicas com a capacidade de produzir à escala métrica, para que se começasse a pensar na integração desta tecnologia na prática da construção em Arquitetura.

Materialidade

A materialidade é outro dos constrangimentos da tecnologia da FA quando aplicada na Arquitetura. A natureza dos materiais utilizados numa obra de Arquitetura é bastante diferente daqueles que são utilizados em produções finais noutras áreas. As características necessárias e inerentes a um edifício, para a providência de abrigo ao homem, são alcançadas pela conjugação de vários materiais, de modo a que, no seu conjunto, atinjam a função pretendida. Assim, é compreensível que sejam utilizados materiais diferentes para a produção de um carro ou de uma peça de roupa, pois desempenham funções diferentes, da mesma forma que diferem daqueles utilizados na Arquitetura. São diferenças específicas de cada área que a aplicação da Fabricação Aditiva encontra também desafios no que toca aos materiais, desses desafios que se tornam específicos na sua aplicação na Arquitetura e na construção.

Tal como a problemática da escala, a aplicação inicial da FA (prototipagem) deveu-se também à natureza dos materiais utilizados, na sua grande maioria de origem sintética, como as resinas da *Estereolitografia* ou os plásticos do *FDM*. Este tipo de materiais era suficientemente satisfatório para a construção de modelos físicos, uma vez que tais objetos comportam um elevado grau de abstração. Mais uma vez, estas características foram compatíveis com a representação em Arquitetura, porém inadequadas à construção.

Quando pensamos num edifício de Arquitetura, a FA já não pode produzir com materiais utilizados em maquetes. Um edifício é uma construção com necessária longevidade e que, para tal, recorre a materiais específicos que lhe conferem essas características, sendo os mais comuns o betão, o vidro, o aço e a madeira. Em contrapartida, para construir, por exemplo, uma peça de mobiliário, como um candeeiro ou uma cadeira, materiais sintéticos e plásticos podem ser adequados a esses tipos de produtos, sem necessidade de grande inovação ou adaptação específica das tecnologias FA. Nessa circunstância, tornou-se imprescindível o surgimento de técnicas igualmente capazes de funcionar com materiais específicos ou compatíveis com a construção de edifícios. Daí que as primeiras técnicas tivessem utilizado materiais cimentícios (ver capítulo 3.2.2).

Na produção de bens de consumo de curta duração, os materiais podem ser escolhidos de acordo com determinadas características, tais como: custos reduzidos, fácil maleabilidade, elasticidade, e resistências moderadas. Já na produção de bens de consumo de longa duração, como automóveis ou barcos, que envolvem maior complexidade e necessidade de performance técnica, os materiais são escolhidos com base noutras características, designadamente: a resistência a

forças externas, hidrodinâmicas ou aerodinâmicas, resistência a choques, *stress* provocados pelo movimento, entre outras. Mesmo no caso destas produções mais complexas, as características materiais da FA disponíveis no mercado estão mais próximas, dada a utilização de materiais sintéticos ou mesmo metais, existindo já tecnologia bastante desenvolvida neste contexto. A par deste fator, a maioria dos componentes de um produto produzido por essas indústrias é composta por uma menor variedade de materiais, quando comparados com os elementos produzidos para a Arquitetura. Existe uma quantidade muito grande de produtos que são produzidos num único material, por exemplo, próteses, mobiliário, vestuário, componentes eletrônicos ou, até mesmo, barcos, que podem ser maioritariamente constituídos por aço. Especula-se até que construções de grandes dimensões, como um barco, irão ser produzidos inteiramente pela tecnologia de FA. No entanto, este tipo de produtos está mais perto da natureza de funcionamento mono-material da FA do que da Arquitetura. Assim, a FA enquadra-se mais facilmente em produções que já utilizam processos mecânicos convencionais, como a injeção por molde ou a extrusão. Já um edifício necessita de providenciar várias funções de conforto para quem o habita, implicando, por isso, um conjunto características mais vastas, entre as quais a adaptabilidade ao meio ambiente, às estações do ano e variações climáticas, ao isolamento térmico e acústico, aos abastecimentos de água e luz, à função estrutural, etc.. E para obter tais requisitos, as estruturas produzidas na indústria da construção resultam de combinações complexas de componentes e diferentes materiais, cada um deles desempenhando uma função específica. A sua conjugação é o que permite atingir a funcionalidade pretendida para um determinado edifício. Por exemplo, no caso de uma parede normal, esta pode ser composta por um conjunto variado de elementos, entre os quais: acabamento exterior (sistema capoto, pintura), isolamento (térmico, acústico, impermeabilização), sistema estrutural (vigas, pilares, armação), massa interna (tijolos, blocos de cimento), revestimento interno (pintura, placas de gesso), vãos (janelas, portas), etc. Dada a complexidade dos elementos de uma obra de Arquitetura, é evidente a dificuldade de integração de um sistema como a FA que, na generalidade das técnicas, utiliza essencialmente um único material. Perante esta dificuldade, é necessário encontrar outras soluções específicas para a aplicação da FA na construção, que sejam capazes de conjugar mais do que um material, satisfazendo, em parte, essa necessidade da construção, ou outros sistemas que se conjuguem com os métodos de construção convencionais ou, até mesmo, novas estratégias que, através da configuração material, simplifiquem elementos complexos (por exemplo, uma parede convencional), mantendo uma performance funcional idêntica. Este tipo de processos será discutido posteriormente, no capítulo 4.

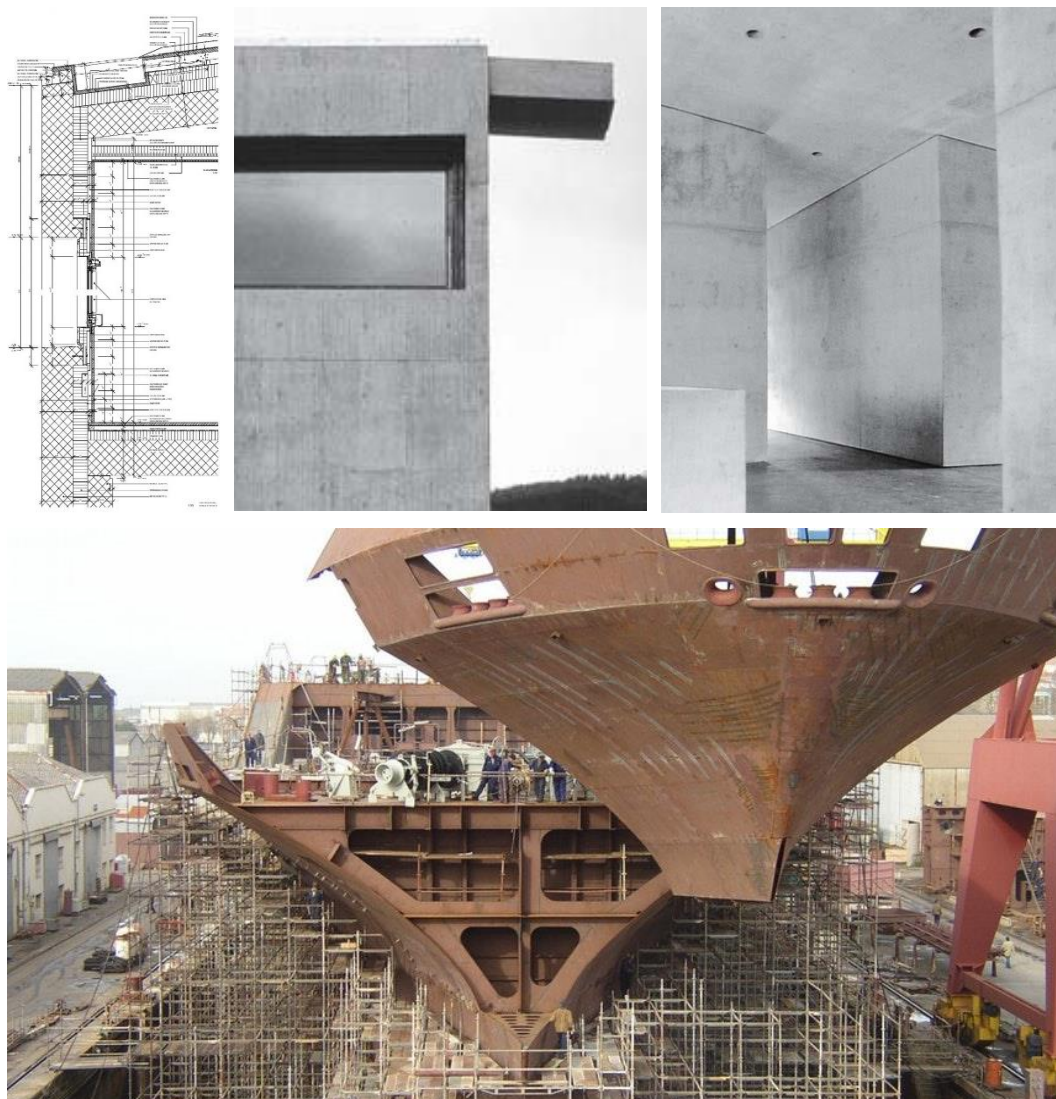


Figura 3.1 – Complexidade material. No pormenor construtivo é visível a combinação de vários materiais que dão a função e estrutura ao edifício (esquerda), numa fachada (centro) e interior (esquerda), aparentemente de um único material, o betão, na escola Paspels do Arquiteto Valerio Olgiati, 1996-1998, Zurique (figuras superiores); Apesar de um navio ter uma complexidade idêntica à de um edifício, é visível que utiliza uma, neste caso, o aço como material principal, como na imagem da construção de um navio no estaleiro naval de Viana do Castelo (em baixo).

Construção

Ao contrário de outras disciplinas, o objeto da Arquitetura não é pequeno, nem móvel e, na maioria das vezes, tem um carácter permanente e é ancorado ao solo, o que implica que grande parte da construção seja feita no próprio local de implantação. Desta forma, a Fabricação Aditiva encontra, nesta característica intrínseca da Arquitetura, mais um desafio para a sua aplicação a este nível.

Nas disciplinas industrializadas, as condições do local do processo de desenho, da transformação do material e da produção ou montagem de componentes não são necessariamente diferentes, pois ocorrem em zonas controladas, podendo concentrar-se tudo no mesmo local ou em locais com características idênticas, como uma fábrica. Por sua vez, na Arquitetura, o local de projeto e a produção estão em ambientes separados. O processo de projeto é geralmente feito num ambiente controlado, de escritório ou oficina, e no caso de produção de modelos físicos, mesmo que seja utilizado uma máquina da FA, não existe necessidade de alteração do ambiente de produção. Já o processo de construção pode ser dividido em duas fases distintas, sendo que a primeira consiste na transformação do material e na pré-fabricação de elementos que serão utilizados na segunda fase, ou seja, a construção em obra que é, tradicionalmente, o local de produção de um edifício. Normalmente, conta com baixo índice tecnológico, recorrendo essencialmente à mão-de-obra intensiva, auxiliada por meios mecânicos. Este trabalho traduz-se, essencialmente, na montagem de todos os elementos que constituem a construção, previamente conjugados no projeto. Daí que, e conforme já referido, a escala e o carácter imóvel de um edifício implica que, ao contrário de outras indústrias, o processo de montagem seja feito no próprio local de implantação. À semelhança de um edifício, também a construção de veículos de grandes dimensões na indústria naval ou aeronáutica apresenta características análogas, não só em termos de escala e complexidade do objeto produzido, mas também no local de montagem que é sempre o mesmo. Com efeito, este pode ter sido um dos fatores relevantes que levaram esse tipo de indústrias a adotar sistemas tecnológicos mais avançados nestes processos de fabricação. Pelo contrário, na indústria da construção, a fábrica e os meios têm de ser sempre deslocados para o local, o que significa a impossibilidade de criar estruturas permanentes de produção industrializadas. Tal facto faz com que a adaptação da FA na Arquitetura tenha que ultrapassar as dificuldades da construção em obra, implicando, assim, o desenvolvimento de tecnologia capaz de ser deslocada e coabitar num meio aberto, normalmente dinâmico,

acidentado, onde se encontra um grande número de operários em execução de tarefas. Estes requisitos são muito diferentes dos que se podem encontrar em fábricas industrializadas controladas ou em produções individuais, como num consultório para produção de um implante dentário, onde a FA tem mais facilidade de integração.

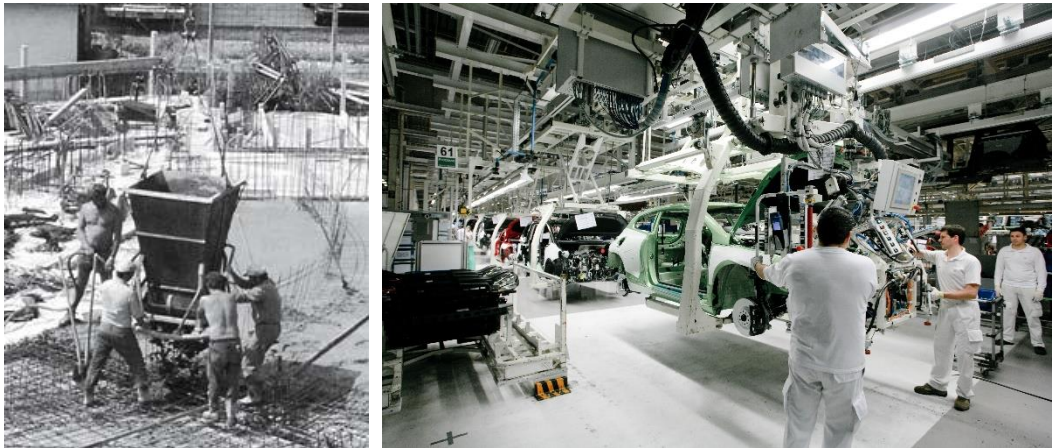


Figura 1.2 - Comparação entre produções. Deposição de betão numa laje, onde é possível identificar a mão-de-obra intensiva, o baixo nível tecnológico e o local acidentado (esquerda); Linha de produção automóvel, na fábrica da VW Autoeuropa, Palmela, Portugal, em que é visível o apoio de meios tecnológicos avançados, assim como uma produção estruturada (direita).

Por outro lado, é perceptível que a construção em obra já utiliza conceptualmente uma abordagem aditiva. Tal como nalguns métodos mais recorrentes na indústria da construção, a cofragem em betão ou o assentamento de blocos têm uma certa semelhança com as tecnologias de FA. Noutras áreas da produção industrial, também é possível verificar abordagens de produção por adição, pese embora, devido à simplicidade dos produtos, seja recorrente a manufatura num único processo, sobretudo em técnicas como a injeção por molde ou fundição. A produção numa única etapa é também uma das principais características da FA, embora sem o recurso ao molde. Esta é outra abordagem de difícil adaptação à realidade da construção, dado que se trata de uma disciplina que envolve um grande conjunto de especialidades, processos e componentes, dificultando assim, em termos práticos, uma simplificação desses processos num único ou de encontrar soluções com uma versatilidade capaz de se adaptar, não só ao local de obra, mas também à grande variedade de práticas e sistemas construtivos existentes.

3.2. Integração da Fabricação Aditiva

Identificadas que estão as dificuldades de integração da Fabricação Aditiva, e uma vez ultrapassadas, tal como aconteceu noutras áreas, é perceptível que a abrangência da sua aplicação na Arquitetura vai *da produção de maquetes... à construção de edifícios*. A primeira aproximação da tecnologia nesta área foi feita através da produção de modelos físicos, à semelhança de outras disciplinas, onde também houve uma passagem da produção de protótipos para a produção de produtos finais. É desta forma que se demonstra como esta tecnologia se tem integrado na construção efetiva de Arquitetura.

3.2.1. Da produção de maquetes...

“Os modelos são uma abstração da representação” (Gibson et. al 2002: 92). Muitas das diferentes formas de representação no processo de desenho em Arquitetura variam do digital ao físico, do bidimensional ao tridimensional. Esboços, desenhos, imagens computacionais realistas, animações e modelos físicos ajudam a demonstrar a ideia de quem cria, quer sejam colegas de trabalho, clientes ou o próprio, constituindo, assim, uma parte fundamental do processo de projeção de um edifício (Seely 2004). Na Arquitetura, a modelação física à escala reduzida é um meio no qual os autores realizam conceitos, ou seja, é a representação tridimensional materializada do desenho, frequentemente utilizada como ferramenta de estudo no processo de projeto (Sass e Oxman 2006), ajudando, deste modo, o arquiteto a compreender as implicações espaciais das suas decisões bidimensionais (Gibson et. al 2002). Normalmente, o processo de projeto remete para uma abordagem de autorreflexão, decorrente da aprendizagem por experiência. Desta forma, *“o conceito de representação é que quanto mais oportunidades de visualização do projeto, melhor os resultados do projeto”* (Sass 2001: 217). É uma forma eficaz, segura e barata de avaliar a solução final, sem ter de esperar pela validação da solução na construção efetiva do edifício (Gibson et. al 2002).

Segundo Ryder et al. (2002), existem três tipos de modelos em Arquitetura: a *maquete de viabilidade*, que, como o próprio nome indica, é passível de se construir, numa abordagem

equivalente ao esboço no desenho, sendo utilizada nas fases iniciais do projeto para compreender a ideia conceptual e dar uma noção volumétrica do mesmo; a *maquete de planeamento*, que já requer mais detalhe e cuidado, estando presente numa fase de validação do projeto e da sua relação com a envolvente; e, por último, a *maquete final de projeto*, que serve de comunicação com o cliente ou com o público, dotada de maior rigor para tentar transmitir ao máximo as intenções da solução final. Seely (2004) identifica ainda que, nalguns projetos, são construídos modelos parciais do edifício, à escala 1:1, já contemplando materiais e soluções reais de construção, com o objetivo de testar o comportamento final da solução projetada.

Normalmente, são utilizadas técnicas tradicionais, essencialmente manuais, na produção de modelos em Arquitetura. Seely (2004) estudou estes processos, onde o executante do modelo tem, em si, a manipulação e o controlo imediato do material, auxiliado por várias ferramentas manuais, como por exemplo, ferramentas de corte, que requerem a combinação de diferentes técnicas. Por conseguinte, Seely refere também que as próprias mãos do executante são igualmente uma ferramenta de trabalho, mas também uma limitação. O processo manual de construção de modelos encontra algumas dificuldades de execução. Gibson et. al (2002) identifica como fatores limitativos: a complexidade geométrica; o nível de detalhe; o rigor; o acabamento; a escala; o resultado final, que é sempre influenciado pela capacidade técnica do executor; o tempo, que é uma constante proporcional ao nível de complexidade e de detalhe; o detalhe dos modelos de esboço, que são sempre sacrificados na sua precisão pela necessidade de obter resultados imediatos; a modelação física, que é uma atividade bastante morosa, tornando, muitas vezes, difícil usá-la como auxiliar de projeto, uma vez que o arquiteto nem sempre dispõe de tempo para fazer modelos, além dos esboços iniciais.

Durante as últimas décadas, o desenho da Arquitetura foi influenciado pelas capacidades das tecnologias digitais, levando alguns arquitetos a explorarem espaços e edifícios com geometrias mais complexas. Porém, dificultam a construção de maquetes por meios tradicionais para projetos com essas exigências. Por outro lado, conforme alerta Sánchez et. al (2005), o trabalho do arquiteto passa, cada vez mais, pelo desenho tridimensional no computador, razão pela qual corre o risco de dispensar o auxílio dos modelos físicos e, por conseguinte, abdicar da perceção volumétrica real do desenho. Neste sentido, foram exploradas técnicas que permitissem que os desenhos produzidos por computador fossem materializados diretamente da informação dos ficheiros digitais, de modo a facilitar a representação de formas complexas e a construção de modelos físicos. Hoje é visível a utilização das tecnologias CAD/CAM nas fases de projeto. A utilização de tecnologias de automação para a produção de modelos de Arquitetura é

referenciada por alguns autores como *prototipagem rápida* (Mitchell e McCullough 1995, Sass e Oxman 2006,), devido à facilidade de materialização de representações físicas. Striech (1996) diferencia dois procedimentos de interação das tecnologias digitais na construção de modelos: primeiro, os desenhos criados por tecnologias CAD que são materializados por tecnologias CAM, a partir da informação digital; e segundo, o processo inverso, onde o modelo físico é traduzido para um modelo digital através de *scanner* 3D. Esta abordagem é evidente nos trabalhos do escritório de Frank Gehry, em Los Angeles, que começou a utilizar, em 1989, tecnologias de CAD/CAM no processo de projeto da sala de concertos *Disney Concert Hall*, aprofundando a prática em edifícios como o *Museu Guggenheim*, em Bilbao. O processo utilizado por Gehry consistia na transferência de informação entre modelos digitais e físicos, começando com maquetes que eram digitalizadas em 3D e davam origem à modelação CAD, como também a novos modelos físicos [Figura 3.3]. Para o *Disney Concert Hall* foram também produzidas maquetes parciais da fachada, à escala real e com materiais e técnicas de fabricação digital, como a fresagem, simulando a complexidade da construção do projeto (Lindsey e Saggio 2001, Iwamoto 2009).

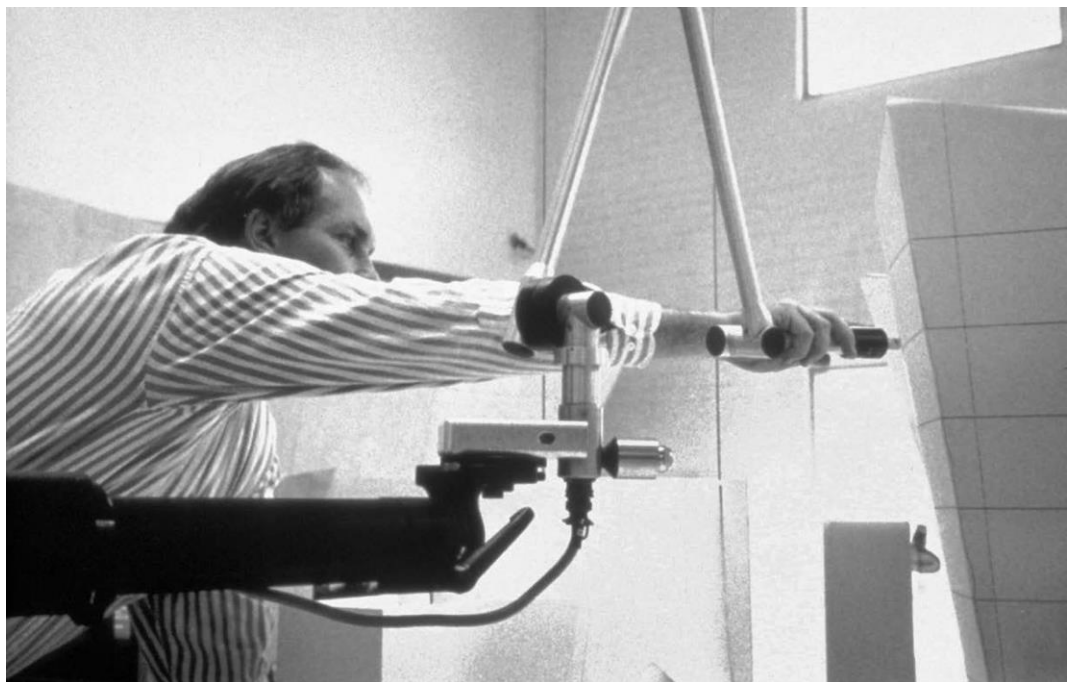


Figura 3.3 – Digitalização tridimensional de uma maquete no escritório de Frank Gehry.

Fabricação Aditiva de modelos físicos em Arquitetura

Ao contrário dos restantes processos de fabricação digital, a Fabricação Aditiva possui uma abordagem mais estreita e direta à construção de modelos físicos, algo similar à prática utilizada pelos arquitetos, desde a década de 50, na impressão dos desenhos CAD. De certa forma, a FA está a fazer o mesmo com os modelos tridimensionais, conforme já havia sido feito com a *plotter* nas representações bidimensionais (Sánchez, et al., 2005). “*A representação digital de um projeto de construção pode ser transformada num modelo [físico] para uma apresentação final, a partir do mesmo conjunto de dados usados para produzir uma animação no ecrã*” (Gibson et al. 2002: 93). A utilização da FA vem então dar continuidade aos métodos utilizados no processo de projeto de um edifício, num ambiente cada vez mais digital. À distância de um clique, o projeto desenhado num computador é materializado sem intermediários. Este processo pode ser repetido várias vezes, com custos reduzidos, determinado somente pelo tempo estimado de fabricação. Ao evitar a execução manual, o arquiteto liberta-se de uma série de restrições, podendo dedicar mais tempo ao desenho e à conceptualização de um projeto, ao mesmo tempo que lhe permite explorar mais hipóteses materializadas de projeto por meios físicos. Por outro lado, a concentração do trabalho do arquiteto no desenho acaba por dirigir as suas competências técnicas para um único meio, permitindo-lhe controlar todas as fases de projeto até a construção: “*as habilidades para criar modelos não são necessariamente as mesmas que aquelas necessárias para a construção de modelos convencional. As competências necessárias remetem para o controlo do computador e da máquina*” (Gibson, et al. 2002: 97). Consequentemente, o próprio processo de projeto poderá tirar partido das características intrínsecas da FA, já descritas no capítulo anterior, uma vez que a construção de modelos pode influenciar diretamente o desenho dos edifícios, devido à facilidade de visualização de geometrias mais heterogêneas.

Vários autores, como Gibson, et al. (2002), Seely (2004) e Modeen (2005), apontaram algumas vantagens da FA na construção de maquetes de Arquitetura, entre as quais se destacam: a habilidade de produzir geometrias complexas e detalhadas; a facilidade de quem projeta conseguir explorar mais desenhos em simultâneo; a capacidade de reprodução e análise do mesmo modelo em diferentes escalas; e a dispensa, em muitos casos, de técnicas complementares para construir. Por outro lado, são também apontadas algumas desvantagens: a velocidade de construção que é um pouco lenta e está dependente de alguns aspetos, como a resolução; a limitação do tamanho dos objetos, sendo sempre influenciados pela capacidade da máquina; o número de materiais disponíveis, que é mais limitado do que outras técnicas; e a aparência homogênea dos modelos construídos, que pode ser um inconveniente.

Introdução da tecnologia

As primeiras abordagens de produção de modelos físicos em Arquitetura com recurso às tecnologias de Fabricação Aditiva foram essencialmente em trabalhos académicos. Com o desenvolvimento da tecnologia, no final dos anos 80, não tardou muito a que alguns investigadores se apercebessem do potencial da FA na produção de maquetes em Arquitetura e quisessem explorar a sua aplicação nesta área. Numa primeira fase, os estudos começaram pela aplicação das tecnologias de fabricação digital à produção de modelos, com é o caso de William Newman e Robert Sproull que, em 1979, falavam de uma *oficina de modelos automáticos*, que já contemplava ferramentas de digitalização e materialização digital, apercebendo-se das capacidades da utilização de máquinas de fresagem CNC para a construção de modelos físicos (Newman e Sproull 1979). Mais tarde, William Mitchell reafirmou ser possível interligar os sistemas gráficos de computador com fabricação maquinada, de forma a facilitar o processo e produção de Arquitetura (Mitchell 1977). Em 1991, o mesmo autor, já falava, no livro *Digital Design Media*, da implementação do método de *forma incremental*, onde incluía algumas as técnicas existentes de FA na produção de protótipos em Arquitetura (Mitchell e McCullough 1995).

Em 1990, a FA foi abordada de forma mais extensiva, com a investigação no Departamento de CAAD e de Métodos de Planeamento na Universidade de Kaiserslautern na Alemanha, levados a cabo por Bernd Streich. Este autor publica, em 1991, a *Creating Architecture Models by Computer Aided Prototyping*, a primeira investigação específica da aplicação da FA na prática, apresentando as possibilidades do uso da *Estereolitografia* no processo de Arquitetura. Na referida publicação consta um modelo físico, à escala 1:100, da obra de Le Corbusier's na *Weissenhofsiedlung* de Estugarda [Figura 3.4] (Streich 1991). Em 1996, foi publicado o livro *Computergestützter Architekturmodellbau* (Construção de Modelo de Arquitetura Assistido por Computador), descrito por Seely (2004) como o primeiro trabalho completo que descreve e explora a modelação assistida por computador na Arquitetura, através de métodos subtrativos e aditivos, apresentando experiências realizadas pelo grupo criado em 1990, assim como as possibilidades de interação entre as tecnologias de digitalização tridimensional e a FA (Streich 1996).

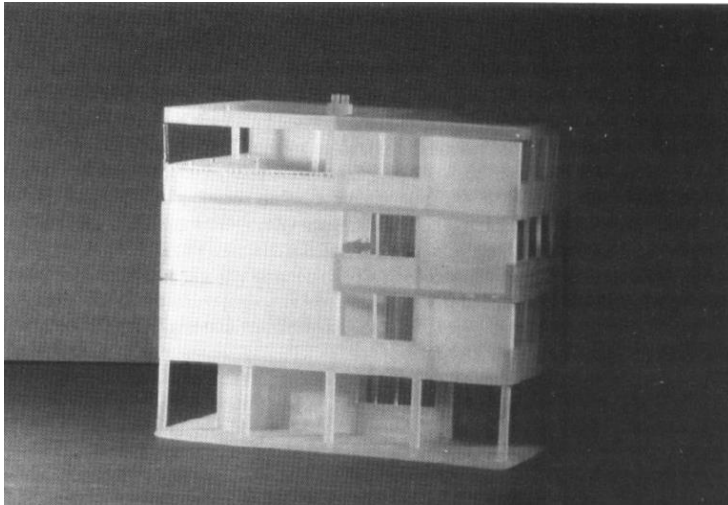


Figura 3.4 – Maquete do edifício de Le Corbusier's na Weissenhofsiedlung de Estugarda, 1991, produzido por Esterelitografia.

Com o objetivo de demonstrar o estudo e a investigação académica realizada neste campo, foi selecionado o trabalho desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology (MIT). Foram várias as investigações académicas e científicas em torno da utilização da FA no processo de projeto. Se contarmos ainda com as invenções de tecnologia FA, como a técnica 3DP, vemos que esta universidade foi uma das grandes impulsionadoras do estudo desta tecnologia e uma das principais responsáveis pela sua aplicação no campo da Arquitetura. Neste contexto, podemos destacar três investigações orientadas por William Mitchell: a de Simondetti (1997), a de Sass (2000) e a de Duarte (2001). Em 1997, Alvise Simondetti tentou, na sua tese de mestrado, desmistificar uma ideia que prevalecia na época, de que estas tecnologias eram somente aplicáveis na parte final do processo de projeto. Com base na experiência adquirida pela utilização de várias tecnologias de FA, entre as quais *LOM*, *Laser Sintering* e *Estereolitografia*, Simondetti aborda a utilização da FA em fases iniciais de projeto, especulando sobre o futuro e os possíveis cenários da sua utilização (Simondetti 1997). Mais tarde, em 2000, Larry Sass conduziu uma investigação, para a sua tese de doutoramento, sobre um novo método de desenho computacional generativo na reconstrução em desenhos tridimensionais. Este método foi aplicado ao estudo de duas *villas* não construídas de Palladio, partindo das informações de projeto e sistemas de construção, sob a forma de texto e regras gráficas contidas no primeiro livro *The Four Books of Architecture* (Palladio e Placzek 1965). O resultado desse estudo deu origem a modelos tridimensionais digitais, que geraram desenhos CAD, *renders* e várias maquetes produzidas com recurso à FA, mais propriamente à tecnologia de *FDM*, que serviram para avaliar o resultado dos desenhos [Figura 3.6] (Sass 2000). Este trabalho continuou a ser investigado mais especificamente em relação a modelos produzidos por FA, posteriormente publicados

noutros artigos (Sass 2003, Sass s.d.). José Pinto Duarte, na sua tese de doutoramento datada de 2001, utilizou a FA, a FDM e a *Estereolitografia* como forma imediata de visualização física dos modelos gerados por computador, a partir do caso de estudo do Bairro da Malagueira, de Álvaro Siza Vieira [Figura 3.5]. Com uma abordagem semelhante à de Larry Sass, José Pinto Duarte utilizou um sistema de desenho generativo, baseado num modelo matemático chamado *gramática da forma*, que compreendia as regras de desenho das casas de Siza Vieira. A partir do conhecimento do projeto, essas regras serviam para que outros arquitetos pudessem gerar casas com as mesmas lógicas, para clientes específicos. O objetivo era encontrar um método rigoroso para compreender e ensinar o trabalho do arquiteto Álvaro Siza, além de demonstrar as possibilidades de um eventual modelo de desenho para personalização em massa de habitações (Duarte 2001).

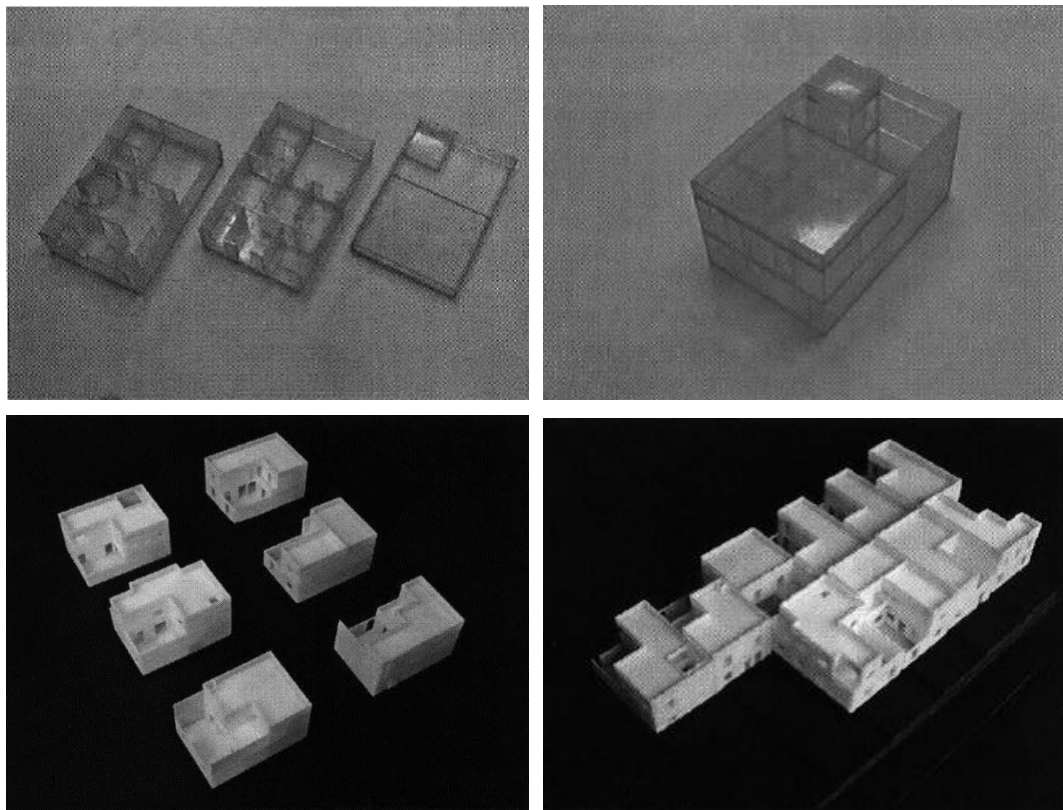


Figura 3.5 – Investigação de José Pinto Duarte, 2001. Maquete de uma habitação, gerada por computador, produzida por Esterelitografia (em cima); Maquetes das casas de um bairro, produzidas por FDM (em baixo).

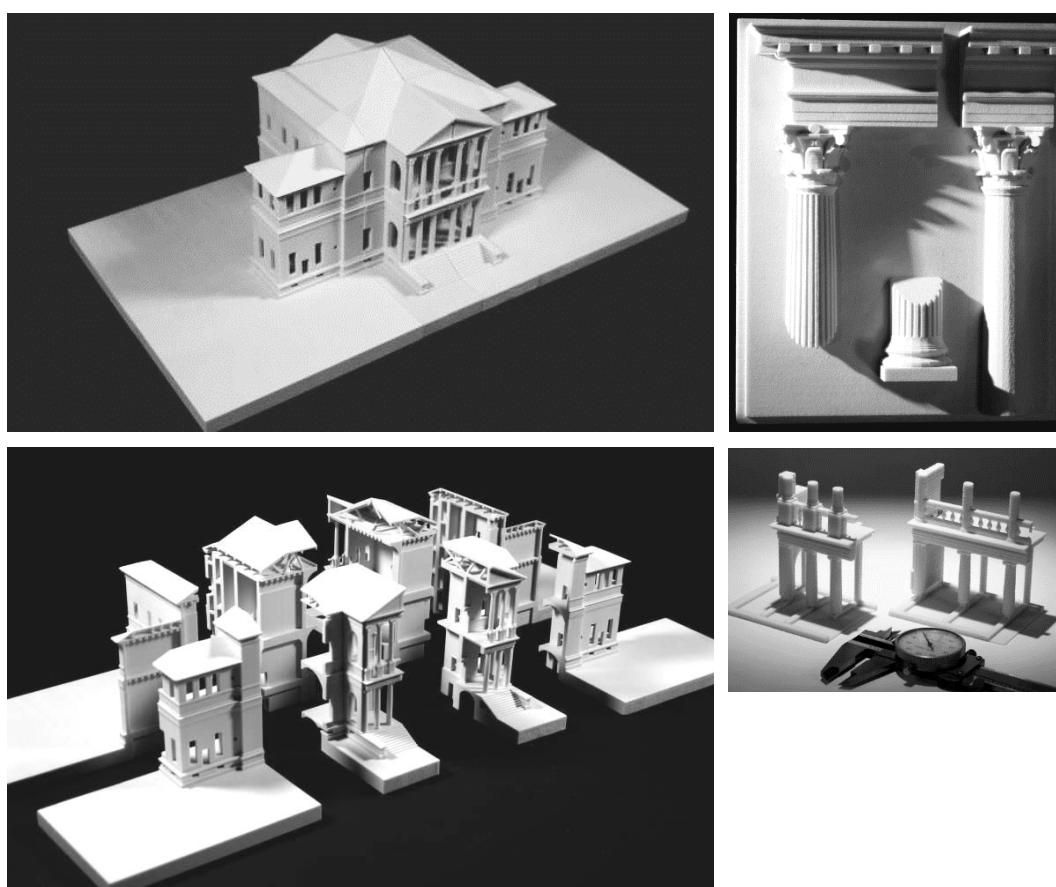


Figura 3.6 – Modelos da villa de Palladio produzidos na investigação de Larry Sass, 2000.

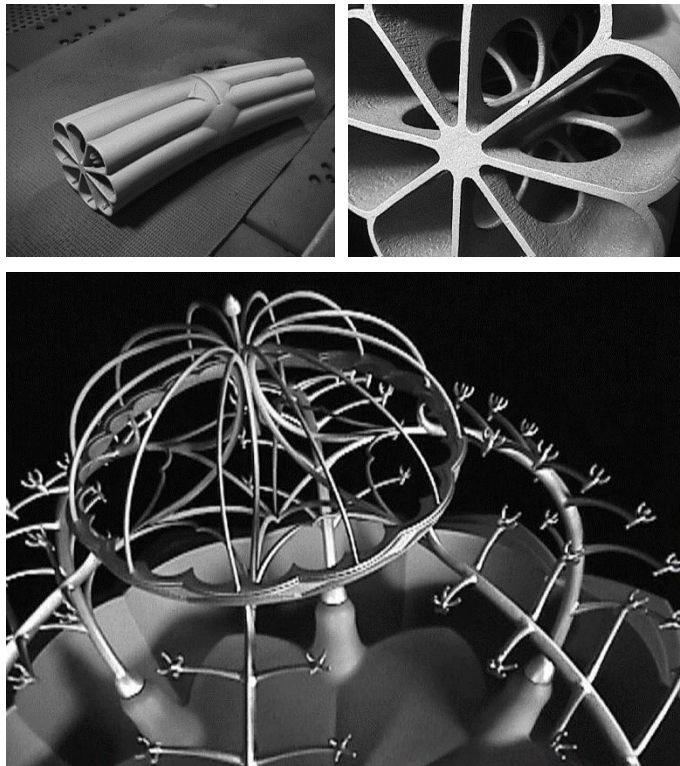


Figura 3.7 – Maquetes, em metal, desenvolvidos por Kevin Rotheroe. Protótipos de componentes à escala real (em cima); Maquete da estrutura de uma cobertura envidraçada (em baixo).

Numa abordagem distinta dos anteriores, o arquiteto Kevin Rotheroe estudou a produção de estruturas de metal com formas complexas, criando componentes com uma elevada capacidade de resistência, através de geometrias otimizadas e com estruturas internas que respondessem a requisitos estruturais em contextos específicos (Rotheroe 2002). No âmbito do estudo levado a cabo pelo grupo de investigação Freeform Design & Manufacturing Research Studio na Universidade de Illinois, em Urbana e Champaign, Rotheroe fabricou modelos em metal, com recurso à tecnologia de *SLS*, de uma estrutura de cobertura de vidro, à escala reduzida, e à escala real, os componentes tubulares dessa mesma cobertura com otimização estrutural [Figura 3.7]. A utilização desta tecnologia permitiu a construção de maquetes com “*uma grande precisão e força mesmo em objetos delicadamente moldados*” (Novitski 1999). Esta foi provavelmente uma das primeiras aplicações em Arquitetura que produziu componentes à escala real e com materiais próximos aos da construção, e certamente um dos primeiros antecedentes da FA aplicada à construção.

Na prática da Arquitetura

Na prática da Arquitetura, surgiram também vários ateliers que começaram a adotar a tecnologia de Fabricação Aditiva para produzirem partes de modelos com geometrias mais difíceis de materializar manualmente. Um dos primeiros a implementar esta tecnologia foi o arquiteto Greg Lynn, que produziu maquetes de alguns dos seus projetos com recurso a este método. Em 1996, utilizou a FA para a maquete do pavilhão *Vienna OMV Corporation*, desenhado segundo um processo de *Cinemática Inversa*, resultando num modelo com formas curvas¹ [Figura 3.8]. Na publicação *Animate Form* (Lynn 1999), apresenta o protótipo de uma casa que representa a sua ideia de movimento e tempo no processo formal de Arquitetura, a *Citron House Prototype*, em Long Island, foi materializada em maquete com a tecnologia de *Estereolitografia*. Por volta do ano 2000, a FA foi introduzida no planeamento da construção da *Sagrada Família* em Barcelona (Burry, Burry, e Faulí 2001), exemplo este explorado mais adiante, no capítulo 4. O escritório de Arquitetura Morphosis adquiriu a primeira máquina de FA em 2001, para testar formas e construir modelos conceptuais. Por norma, os edifícios desenhados por este gabinete têm geometrias pouco comuns e complexas. Desta forma, em 2004, a utilização da FA ajudou os arquitetos a visualizar e comunicar o átrio labiríntico do *Cahill Centre* para Astronomia e Astrofísica, no Instituto de Tecnologia de Califórnia [Figura 3.9] (Doscher 2010).

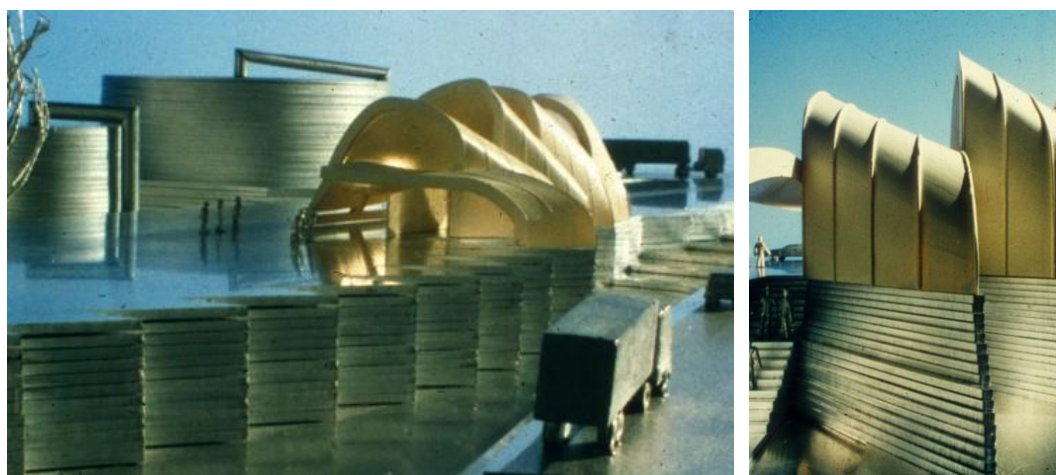


Figura 3.8 – Maquetes do projeto *Vienna OMV Corporation*, Greg Lynn, 1996.

¹ A informação deste projeto está pode ser consultada na página da internet de Greg Lynn, disponível em: <http://glform.com/buildings/h2-house/>

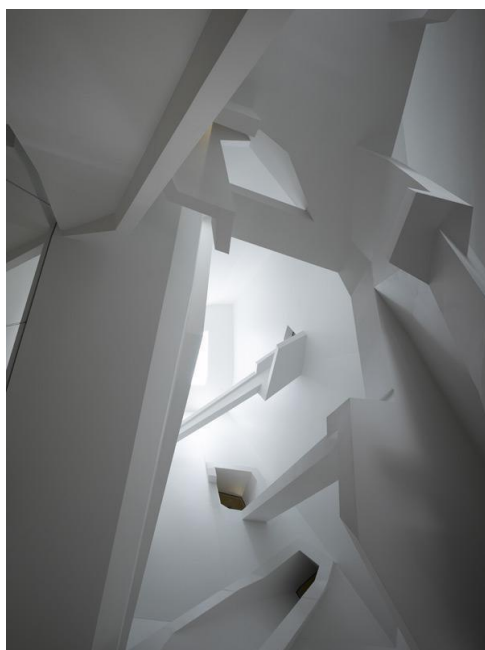


Figura 3.9 – Cahill Centre, Morphosis, 2004. Fotografia do átrio, construído (em cima); Maquete do átrio de distribuição do projeto (em baixo).

Também o gabinete Foster + Partners utiliza esta tecnologia desde meados da década de 2000, onde inclusivamente têm um grupo destinado ao estudo da modelação física e digital de modelos. O Specialist Modelling Group (SMG), fundado em 1997, é um grupo de investigação e consultoria, dentro do próprio gabinete Foster + Partners, que se dedica à investigação das capacidades avançadas de modelação digital, permitindo às equipas de desenho do escritório explorar e materializar as soluções de projeto (Peters e Kestellier 2006). Trata-se de um gabinete especializado em geometrias complexas, desenho paramétrico, programação, simulação e fabricação rápida, onde são feitos em média 5000 modelos físicos por ano, com recurso à FA (Whitehead et al. 2011). A aplicação da tecnologia de FA foi *“inicialmente vista como a fabricação de modelos esboço nas fases iniciais do projeto, num departamento inteiramente dedicado a este propósito, em particular para projetos com geometrias complexas (...) e é agora vista como uma ferramenta de desenho essencial para muitos projetos e em muitas fases de projeto”* (Peters e Kestellier 2008: 382). Todo este processo tem evoluído, na medida em que o *“[...] tempo entre um desenho rápido e uma impressão 3D em cima da mesa, está se tornando cada vez mais curto”* (Whitehead et al. 2011: 242). Daí que a utilização desta tecnologia seja cada vez mais importante, sobretudo quando se trata de um escritório de grandes dimensões e múltiplas equipas, como o caso do Foster + Partners. Esta prática acaba por alterar as dinâmicas de revisão de projeto, conforme afirma o responsável pelo SMG, Hugh Whithead: *“quando um colaborador sénior anda pela sala, as equipas de projeto mostram o projeto passo a passo, permitindo uma tomada de decisão muito mais rápida”* (Whitehead et al. 2011: 243). A utilização da FA serviu de auxílio vários projetos, entre os quais o *Queen Alia Airport* [Figura 3.11] e o *Chesa Futura Residences* [Figura 3.12].

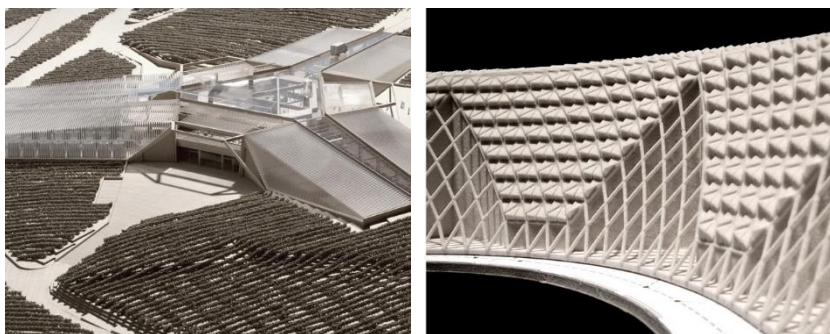


Figura 3.10 – Maquetes produzidos pelo Specialist Modelling Group com tecnologia FA. Maquete de apresentação da adega “Faustino” em Espanha (esquerda); Maquete de estudo para o projeto “Eurogate” na Alemanha (direita).



Figura 3.11 - Queen Alia Airport, Foster + Partners. Maquete do modulo da cobertura (esquerda); Elemento da cobertura em construção (direita).

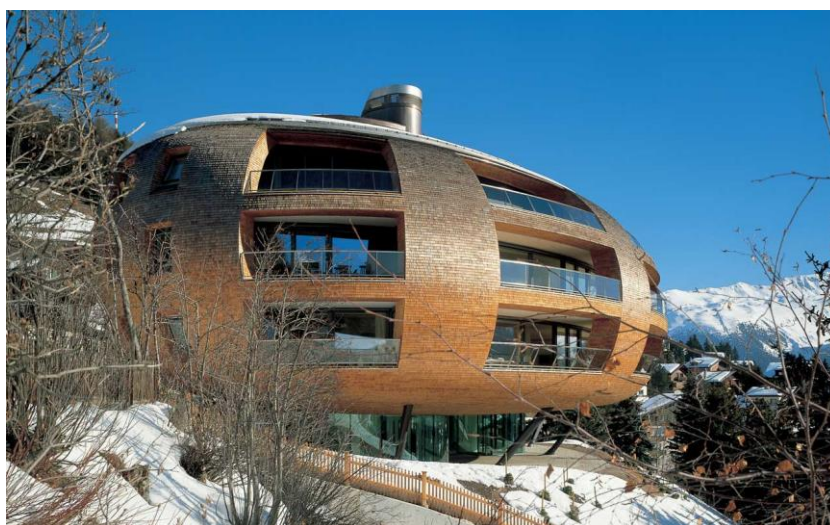
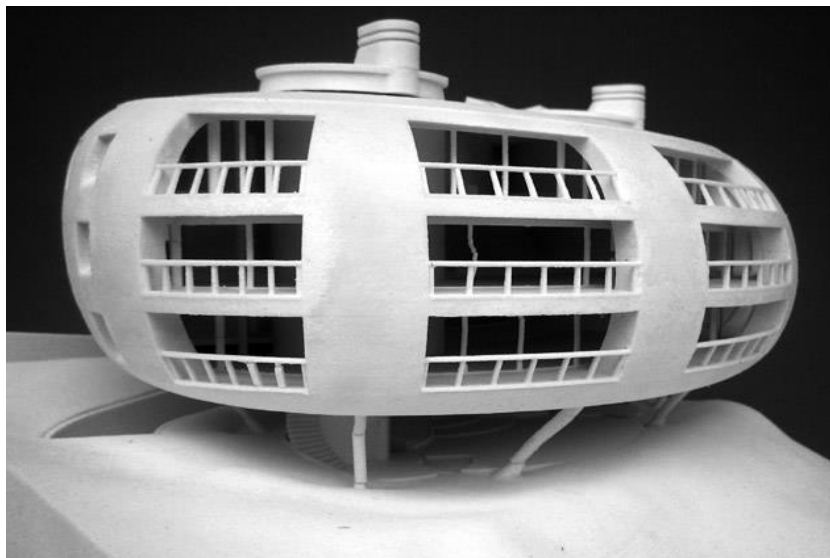


Figura 3.12 – Chesa Futura Residences, Foster + Partners, 2000. Maquetes produzidas pelo SMG (em cima). Edifício (em baixo).

3.2.2. ... à construção de edifícios

À medida que a aplicação da Fabricação Aditiva na construção de maquetes se tornou numa área de interesse e cada vez mais acessível, surgiu também a intenção de encontrar soluções que permitissem a construção do produto final da Arquitetura. Na verdade, o panorama atual da indústria já é baseado numa abordagem aditiva de assemblagem de componentes construtivos em obra. Porém, a introdução de meios de automação neste ambiente é muito mais complexa do que em outras áreas, conforme visto anteriormente.

No entanto, a FA não foi a primeira tentativa de utilização de sistemas mecanizados ou automatizados à grande escala, em construção pré-fabricada ou *in-situ*. Apesar de tudo, as tentativas do passado não foram eficazes, a ponto de se tornarem correntes numa indústria que ainda é baseada na mão-de-obra intensiva e que permanece relutante às mudanças tecnológicas. Tal parece incompreensível, sobretudo quando verificamos que as primeiras ferramentas mecanizadas que surgiram durante a época do Renascimento foram idealizadas para a indústria da construção. Da Vinci, Brunelleschi e Ghiberti desenharam e desenvolveram mecanismos para a construção, entre os quais os primeiros tipos de manipuladores, ferramentas essas que permitem operações de movimentação, orientação e de posicionamento (Linner, 2013). Mais tarde, já na era moderna, houve várias tentativas de aplicar sistemas mecanizados e automatizados na indústria da construção, ainda que nenhum destes tenha sido implementado como prática corrente. Exemplos disso são os ambientes industrializados, motivados pelo *Taylorismo* e pela escassez da habitação do pós-guerra na década de 20, provenientes dos sistemas de grua pórtico da indústria naval *Bauschiffe*, como o *Bauhelling* de Adolf Sommerfeld's ou a *Hausbaumaschine* - "máquina de construção de casas" - de Neufert [Figura 3.13] (Linner, 2013). Outra abordagem é a *Lifting Technology* para construções verticais, utilizada na *BMW-Tower*, em 1972 [Figura 3.14] (Linner, 2013). No Japão, na segunda metade da década de 80, surgiram várias tentativas de interação entre operários e sistemas automatizados, através da criação de vários robôs com funções específicas, que operavam no local de obra, muitos deles semelhantes a sistemas de FA, melhor descritos adiante, como os robôs de *spray* de isolamento corta-fogo [Figura 3.15] (Yoshida 2006). Mas, o auge dos desenvolvimentos no Japão terá sido, provavelmente, a construção de uma torre de 20 andares para o Juroku Bank, em 1991, utilizando o *SMART System*, desenvolvido pela empresa Shimizu [Figura 3.14] (Sousa 2010). Ora, estes exemplos servem para demonstrar que, apesar de haver uma certa dificuldade na adoção de novas tecnologias por parte na indústria da construção à grande escala, tentativas houveram com vista à otimização dos processos construtivos por via tecnológica, em processos como a adição de componentes ou a assemblagem. Muitas destas soluções são parentes próximos da

FA, não tanto pela abordagem em si, mas pelas mesmas dificuldades que enfrentaram e pelas soluções que encontraram para as ultrapassar, por exemplo, a questão da escala. Note-se que, mesmo algumas das técnicas de FA à escala da construção adotaram soluções idênticas às descritas, como pórticos em carris, plataformas elevatórias ou braços robóticos.

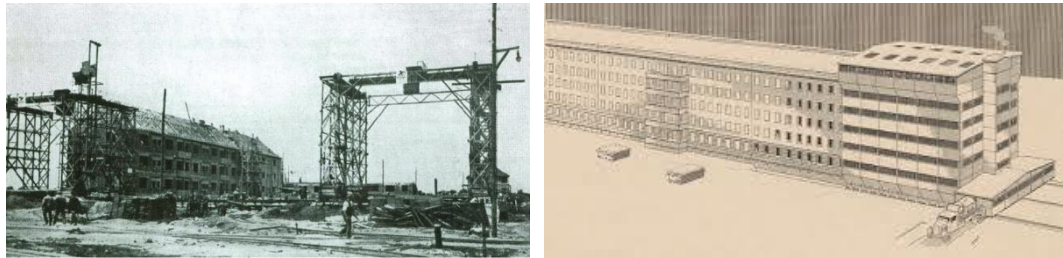


Figura 3.13 – Processos industrializados de construção horizontal in-situ, na década de 20. Bauhelling de Adolf Sommerfeld's (esquerda); Hausbaumaschine de Neufert (direita).



Figura 3.14 – Processos industriais de construção vertical ins-situ. Construção da BMW-Tower em 1972. Após a construção de um núcleo central onde continha os serviços do edifício, o sistema caracterizava-se pela construção dos andares junto ao solo, em torno do núcleo, e elevados, um por um, à medida que fossem sendo construídos (esquerda). Construção do Juroku Bank em 1991. Este método consistia numa plataforma de elevação automática, que subia ao longo da construção do edifício, onde integrava em ambiente de fábrica um conjunto de sistemas automatizados, como soldagem ou montagem de painéis (direita).



Figura 3.15 - Robô de spray de isolamento corta-fogo, desenvolvido pela empresa japonesa Shimizu.

Surgimento

O esforço realizado para encontrar soluções da tecnologia de FA à escala da Arquitetura tem sido uma constante desde a década de 90, começando pela investigação de Joseph Pegna, (1997). Inspirado pelas pinturas de areia dos Navajo, Pegna verificou que o principal problema deste processo residia no facto de o aumento da complexidade na produção implicar forçosamente o aumento da complexidade das tarefas necessárias para a própria montagem dos elementos na construção de um edifício. Daí que tenha optado por substituir a grande quantidade de especialidades necessárias num processo de construção por um conjunto de operações numéricas facilmente controladas por computador, em que os “*conjuntos complexos de grandes componentes construtivos são substituídos por um grande número de componentes elementares*” (Pegna 1997: 427). A solução passava pela deposição de uma camada de areia, seguida da deposição seletiva de cimento *Portland*, usando água como agente de ligação, similar às técnicas de *Binder Jetting*. Outra das suas noções pioneiras foi a consciência do impacto sustentável que as tecnologias deste género podiam vir a ter, idealizando a utilização de material reciclado, como barro ou gesso, ou o desperdício quase nulo (Pegna 1997).

Após a abordagem pioneira de Pegna, surgiu a técnica *Contour Crafting*, desenvolvida por Behrokh Khoshnevis na Universidade do Sul da Califórnia, na Viterbi School of Engineering, nos Estados Unidos da América. Divulgada em 1996, esta foi a primeira técnica eficaz de FA à escala da construção. O estudo desta técnica teve como principal objetivo encontrar um método que permitisse uma total automação na construção, centrando toda a investigação não só no processo central de FA, mas também nas formas de integração de outros sistemas construtivos, como a colocação automatizada de varões metálicos estruturais. O método *Contour Crafting* foi baseado nas tecnologias de *Material Extrusion* e o seu funcionamento descrito como

“um processo de fabricação por camadas à escala real [mega scale layered fabrication] no qual constrói partes tridimensionais à grande escala por deposição, camada por camada, de materiais pastosos a velocidade inédita e com qualidade da superior” (Khoshnevis et al. 2006: 301). Um dos aspetos mais relevantes do *Contour Crafting* é a possibilidade de utilizar este sistema diretamente no local de obra, de modo a substituir os métodos de cofragem convencionais por uma abordagem livre de molde. Segundo Khoshnevis (2004: 18), *“o método CC será capaz de completar a construção de uma casa inteira numa questão de horas (menos de 2 dias para um edifício de dois andares com 200m²) em vez de vários meses como é prática comum”*. No local de obra, a tecnologia de extrusão é colocada num sistema de grua em pórtico, movendo-se ao longo de duas calhas [Figura 3.16]. Mais recentemente, estão a ser estudados sistemas capazes de fabricar várias casas de uma só vez ou direcionados para edifícios com vários pisos (Zhang e Khoshnevis 2013).

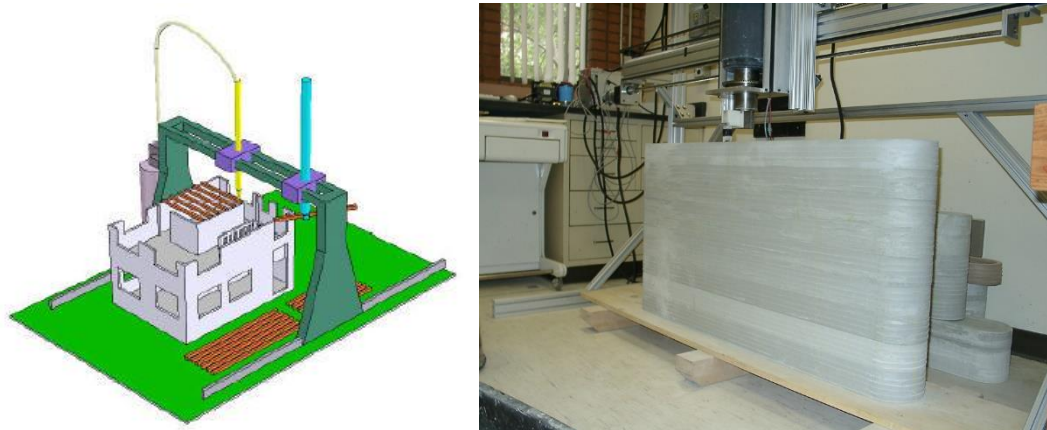


Figura 3.16 – “Contour Crafting”. Modelo do sistema de deposição em obra (esquerda); Fabricação do protótipo de uma parede (direita).

Motivado pelos desenvolvimentos anteriores, investigadores do Innovative Manufacturing and Construction Research Centre na Universidade de Loughborough, no Reino Unido, têm vindo a desenvolver, desde 2006, a técnica *Freeform Construction*, contando com o apoio de parceiros, como Foster+Partners e Buro Happold. Este processo é similar ao Contour Crafting, embora esteja centrado nas oportunidades de desenho, por exemplo, composições complexas e funcionalidades integradas, visíveis no protótipo *Freeform Wall* (De Kestelier et al. 2009). Outra das características distintas desta investigação foi o controlo do percurso de deposição, onde o material, em vez de ser depositado constantemente num plano horizontal, é colocado de acordo com a curvatura da superfície, facilitando, assim, a construção de formas livres (Lim et al. 2016). *“Com este processo os filamentos de extrusão tornam-se visíveis e podem mesmo ser*

vistos como parte da estética da peça" (De Kestelier 2012: 3), “*as camadas dão aos objetos um sentido da materialidade do processo de construção [...]*” (Lim et al. 2012: 266). Este método é visível no protótipo de um painel com dupla curvatura, exposto no Building Centre Exhibition, Londres em 2011 [Figura 3.17].



Figura 3.17 – Painel, com dupla curvatura, fabricado pelo sistema “Freeform Construction”.

Enrico Dini foi o inventor da técnica *D-Shape* e fundador da empresa com o mesmo nome, tendo lançado a sua primeira patente em 2006 (Dini, Chiarugi, e Nannini 2008). Este método é distinto do *Freeform Construction* e do *Contour Crafting*, sendo similar às técnicas de *Binder Jetting*. Começa pela deposição de uma camada de areia e que, ao longo dessa superfície, é seletivamente depositado o agente de ligação. Enquanto o material vai solidificado, o processo é repetido sequencialmente nas camadas seguintes (Ceccanti et al. 2009). O processo só termina com a remoção do material excedente não salificado, revelando o objeto final (De Kestelier et al. 2015). Desta forma, Gardiner (2011) destaca que o material excedente providencia suporte para balanços na geometria, permitindo uma liberdade formal muito superior às outras duas técnicas. Segundo os autores, a tecnologia pode operar em dois ambientes diferentes: o primeiro, em que o edifício é construído por inteiro diretamente no local de obra; e o segundo, em que componentes do edifício são pré-fabricados junto à obra (Cesaretti et al. 2014). Alguns projetos foram fabricados para demonstrar a potencialidade desta técnica à escala da Arquitetura, como a *Radiolaria* em 2008 [Figura 3.18], que, segundo Gardiner (2011), foi a primeira estrutura a ser construída integralmente por FA, ou a *La casa tutta di un pezzo* em 2010 [Figura 3.18].

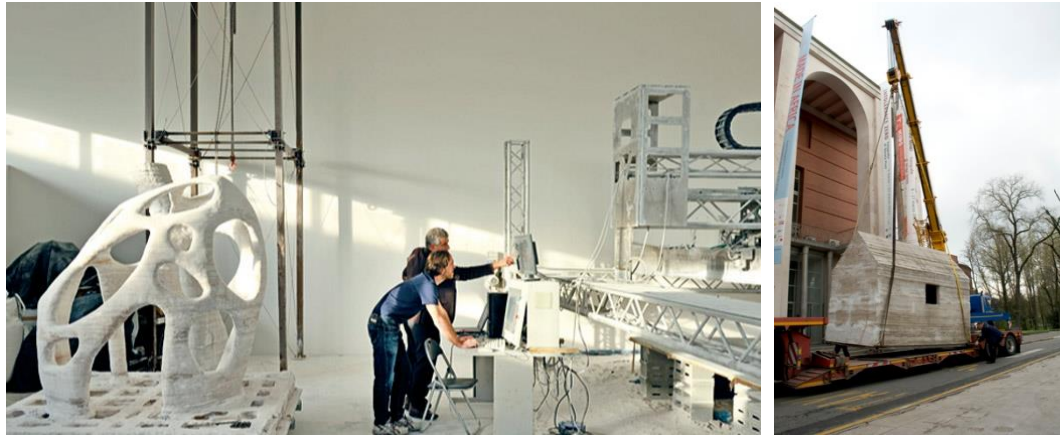


Figura 3.18 – Tecnologia D-shape. Primeiro protótipo do pavilhão “Radiolaria” (esquerda); “La casa tutta di un pezzo” (direita).

Desenvolvimento

Após o lançamento deste campo de investigação, vários investigadores interessaram-se pela exploração da tecnologia de Fabricação Aditiva aplicada à Arquitetura, motivados não só pela investigação das oportunidades de desenho, mas também pelo desenvolvimento de novas tecnologias específicas para a construção. Numa fase inicial, perante a ausência de tecnologia de grandes dimensões, alguns arquitetos procuraram utilizar a tecnologia de pequena dimensão, já desenvolvida e disponível comercialmente. As investigações caracterizaram-se, numa primeira fase, pela construção de protótipos de pequenos componentes construtivos, por exemplo, tijolos, que tinham dimensões suficientemente pequenas para serem fabricados à escala 1:1. De notar que, nestes projetos houve uma grande intenção de utilizar materiais cerâmicos, provavelmente pela facilidade de adaptação aos sistemas existentes, sendo um material comum na indústria da construção, tal como aconteceu nos projetos *Planter Bricks*² em 2009 [Figura 3.19], *Ground Substance* em 2009 [Figura 3.19] (Sabin 2010), ou *Building Bytes* em 2013 (Peters 2014). Numa mesma abordagem, mas utilizando máquinas industriais de fabricação em metal, encontra-se o componente para uma junta estrutural para um sistema de fachada, o *Nematox II* em 2013 [Figura 3.19] (Strauss 2013), ou o componente desenvolvido pela empresa de engenharia Arup, que será aprofundado no capítulo 4. Esta abordagem deu origem a outros projetos, a uma escala mais próxima da Arquitetura, como pavilhões materializados pela produção de grandes quantidades de elementos. Estes são constituídos, na maioria dos casos, por materiais comuns nos tipos de tecnologias acessíveis ao público,

² Mais informação sobre este projeto pode ser vista na página na internet do estúdio Rael San Fratello, disponível em: <http://www.rael-sanfratello.com/?p=60>



Figura 3.19 - Protótipos de componentes produzidos por máquinas de pequenas dimensões. “Planter Bricks”, 2009 (esquerda); “Ground Substance”, 2009 (centro); “Nematox II”, 2013 (direita).

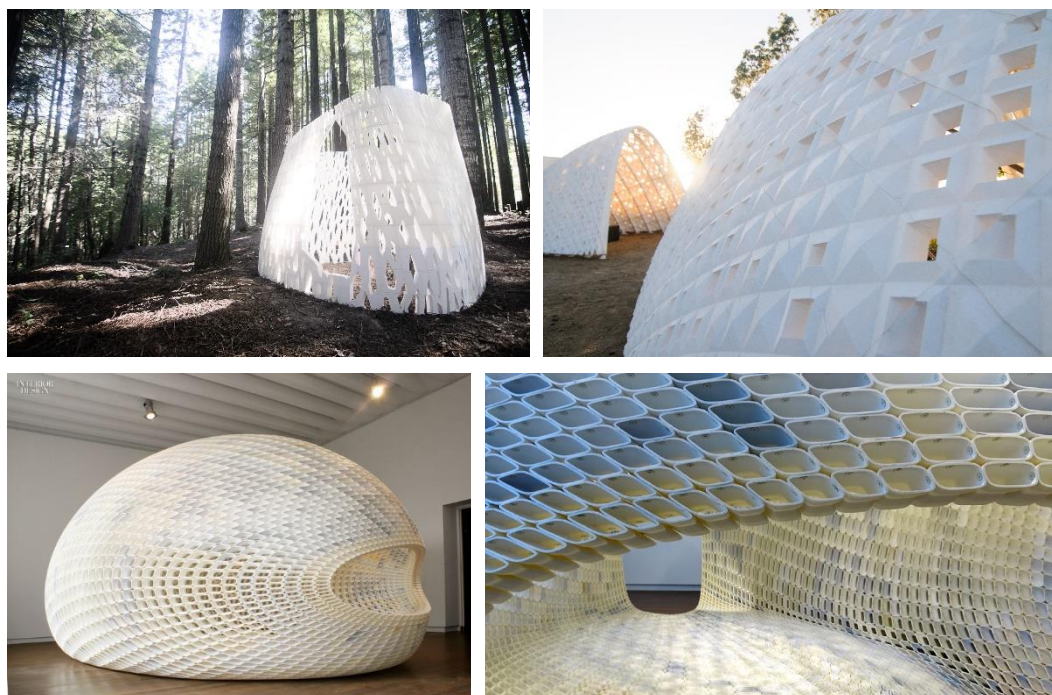


Figura 3.20 – Pavilhões fabricados por máquinas de pequenas dimensões. Projetos desenvolvidos pelo Smith Allen Studio, “Echoviren”, 2013, e “Salsolis”, 2015, respetivamente (em cima); “Project Egg”, 2013 (em baixo).

como o plástico. Exemplo disso é o conjunto de instalações e pavilhões dos Smith Allen Studio desde 2012 [Figura 3.20]³, ou dos Emerging Objects. Outro dos exemplos que utilizam máquinas *desktop* é o *Project Egg* [Figura 3.20], datado de 2013, que emprega esta tecnologia como meio para a cooperação comunitária. É composto por 4760 peças, fabricadas por pessoas globalmente dispersas que, segundo o autor Michiel van der Kley, com “*este método, a comunidade de fabricação, pode ser vista como um novo tipo de fábrica amplamente difundida*”⁴.

Por outro lado, nos últimos anos têm surgido algumas máquinas industriais capazes de produzir objetos com dimensões em metros, desenvolvida, por exemplo, para as indústrias metalúrgicas. Este tipo de tecnologias também foram usadas para produzir componentes ou moldes à escala real. É exemplo disso a instalação do *Digital Grotesque* em 2013, de Benjamin Dillenburger e Michael Hansmeyer, ou as lajes do Block Research Group, na ETHZ, ambos aprofundados no capítulo 4. Numa abordagem construtiva, é de salientar o molde de cofragem perdida para betão, desenvolvido pelo Studio EZCT Architecture & Design Research em 2014⁵ [Figura 3.21]. Mas, o maior dos projetos que podem ser referenciados neste contexto é o projeto do protótipo da *AMIE* de 2015 [Figura 3.21], que resultou de uma parceria entre o Oak Ridge National Laboratory e o gabinete de Arquitetura SOM. Com base numa máquina de extrusão de polímeros capaz de produzir objetos à escala real, desenvolveram um projeto direcionado para a sustentabilidade, que inclui a construção de uma pequena casa móvel feita em painéis modulares⁶.

³ Os projetos desenvolvidos pelo Smith Allen Studio podem ser consultados em: <https://cargocollective.com/SmithAllen>

⁴ A citação foi retirada da página na internet de apresentação do *Project Egg*, disponível em: <http://projectegg.org>

⁵ Mais informação sobre este projeto pode ser vista em: <https://www.voxeljet.com/branchen/cases/betonguss-mit-sandformen/>

⁶ A apresentação do projeto *AMIE* encontra-se disponível em: <https://www.som.com/projects/amie>

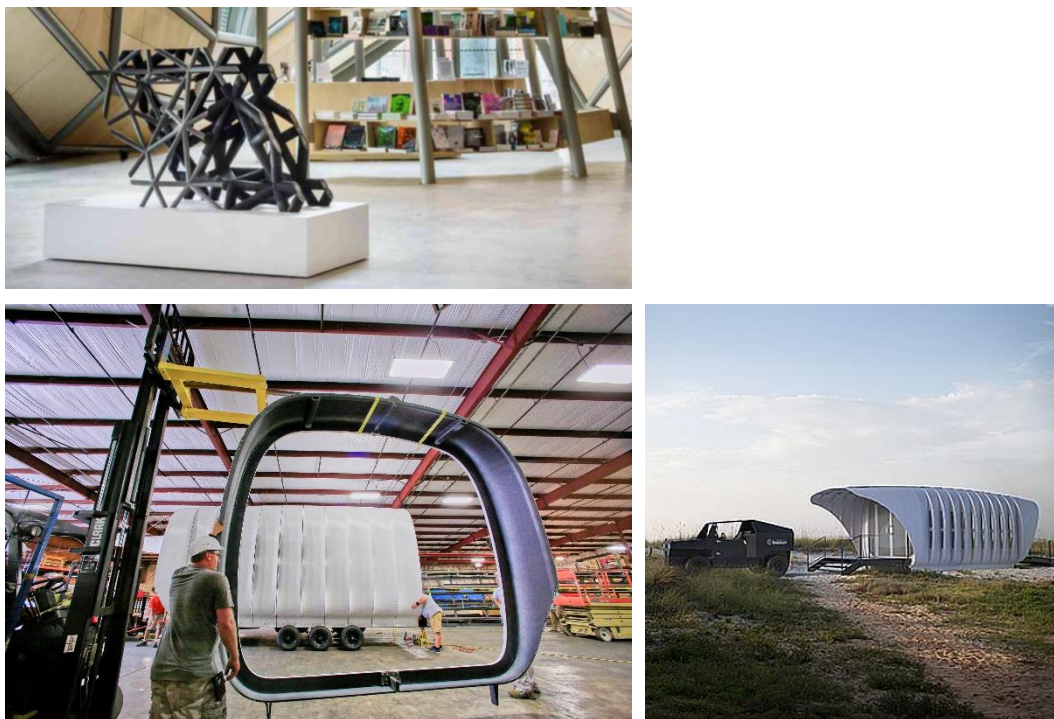


Figura 3.21 – Projetos produzidos por tecnologia comercial de grande escala. Projeto desenvolvido por Studio EZCT Architecture & Design Research, 2014 (em cima); Projeto “AMIE”, 2015 (em baixo).

As investigações pioneiras, *Contour Crafting* e *Freeform Fabrication*, deram origem a um crescente desenvolvimento de sistemas à grande escala de FA, específicos para a indústria da construção. Ao contrário dos exemplos anteriores que utilizavam sistemas adaptados ou sistemas industriais de aplicação genérica, a tecnologia desenvolvida caracteriza-se pela possibilidade de utilização, em obra, de materiais recorrentes na construção (sobretudo materiais cimentícios baseados no betão), capazes de construir estruturas mais duradouras e passíveis de serem utilizados na construção efetiva de edifícios. Estas construções nada mais são do que testes à tecnologia desenvolvida, com base na construção de protótipos e, nalguns casos, em aplicações singulares em ambiente real. Algumas empresas desenvolveram sistemas de deposição em betão, como a Cybe na Holanda, desde 2013 [Figura 3.22], a Total Kustom em 2014, a Apis Core na Rússia [Figura 3.22] ou a Francesa XtreeE [Figura 3.22]. Estas empresas já alcançaram sistemas capazes de operar *in-situ*, tendo já sido utilizadas em projetos piloto de habitações ou pequenos edifícios.



Figura 3.22 – Projetos protótipos, desenvolvidos por empresas para demonstrar a suas tecnologias de deposição em betão. Cybe (esquerda); Apis Core (centro); XtreeE (direita).

Para além dos sistemas de deposição em material cimentício, surgiram outros métodos com abordagens desenvolvidas por arquitetos especificamente para as problemáticas da Arquitetura, como a máquina de polímeros utilizada pelos DUS Architects desde 2012, cujos respetivos projetos serão abordados no capítulo 4, ou o projeto *Digital Construction Platform* desenvolvido pelo Mediated Matter, MIT, que deposita espuma poliuretano com dupla função: a de cofragem perdida e de isolamento [Figura 3.23] (Keating et al. 2017). No Instituto de Arquitetura Avançada da Catalunha (IAAC) foram desenvolvidos vários projetos, dois dos quais com o objetivo de diminuir os constrangimentos e os custos da aplicação da FA em obra. São eles: o *One site robotics*, um sistema de deposição por cabos; e o *Minibuilders*, um sistema cooperativo que, contrariamente à maioria das abordagens que utilizam mecanismos de grandes dimensões, utiliza um conjunto de pequenas máquinas com diferentes funções [Figura 3.23]⁷. Por sua vez, o MX3D utiliza um mecanismo semelhante à soldagem para construir objetos de grandes dimensões em metal (Wit 2018), como o *MX3D Bridge*, que funcionou como uma prova de conceito para a construção de uma ponte *in-situ* a partir das margens de um rio [Figura 3.23]⁸, ou ainda a empresa Branch Technology, que utiliza um processo híbrido de extrusão espacial denominado por *Cellular Fabrication* (C-Fab), que deposita o material numa malha tridimensional parcialmente oca (Wit e Daas 2018). A maior utilização desta tecnologia foi a construção do pavilhão *Flotsam & Jetsam* em Miami, desenhado pelo *atelier* de Arquitetura SHoP em 2016 [Figura 3.23] (Wit e Daas 2018).

⁷ Mais informação sobre o projeto *Minibuilders* pode ser consultado em: <http://robots.iaac.net/>

⁸ Os projetos do MX3D podem ser consultados em: <http://mx3d.com>

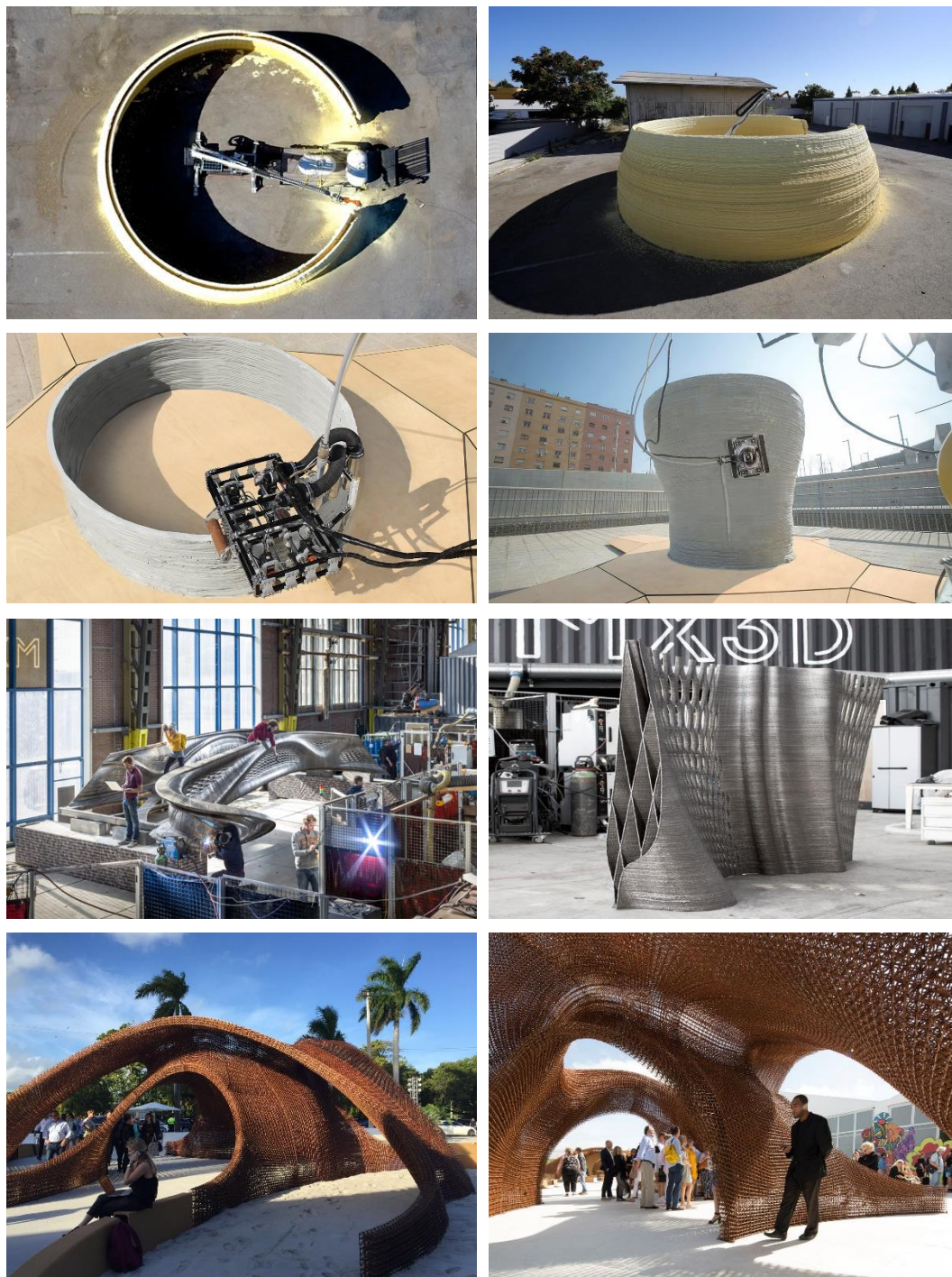


Figura 3.23 – Processos e tecnologia desenvolvida por arquitetos, que não utilizam a deposição em betão. Digital Construction Platform (primeira linha); Minibuilders (segunda linha); MX3D, onde é visível a ponte construída à esquerda (terceira linha); Pavilhão Flotsam & Jetsam, fabricado pela tecnologia da Branch Technology (quarta linha).

As tecnologias de deposição supra referenciadas utilizam essencialmente tecnologias derivadas das técnicas padrão, enquadradas na classificação tecnológica do capítulo 2.3. Alguns autores, como Gramazio, Kohler e Budig (2013: 2), temem o empobrecimento da disciplina da Arquitetura com a possível utilização destas tecnologias: *“o caráter genérico da impressão 3D representa uma grave limitação à sua aplicação à escala do edifício. Não sobra espaço para um arquiteto projetar ou mesmo modificar os aspetos físicos do processo. A padronização da lógica de deposição material e resolução, torna difícil para o processo lidar com a complexidade específica da Arquitetura”*. No entanto, a par da exploração crescente das tecnologias, surgem outros desenvolvimentos tecnológicos experimentais, que visam customizar os próprios processos, aproximando-se da multiplicidade das lógicas construtivas visíveis na Arquitetura, podendo, um dia, virem a transformar-se em soluções de fabricação viáveis. Estas soluções passam por ser uma alternativa à deposição e caracterizam-se pela expressão material, que juntamente com os exemplos anteriores, demonstram que a FA se encontra numa fase dinâmica, em que a perfusão de métodos e técnicas testam os limites os seus limites. Por exemplo, os alunos da Marta Malé-Alemaný, no IAAC, desenvolveram várias máquinas de fabricação, explorando diferentes materialidades, desde a utilização de areia, à cera e cerâmica, entre outros [Figura 3.24] (Malé Alemany 2016). O grupo Gramazio Kohler Research, da ETH Zurich, também desenvolveu vários projetos experimentais. Já o *Rock Print* [Figura 3.25], realizado em parceria com o MIT Self-Assembly Lab (Aejmelaeus-Lindström et al. 2017), é um protótipo com uma técnica desenvolvida especificamente para dar estrutura e forma a um conjunto de pedras, através da deposição controlada de uma corda que atua de forma semelhante a um aglutinante, como nas técnicas de *Binder Jetting*. Segundo Aejmelaeus-Lindström et al. (2016: 28), a construção de estruturas agregadas dá *“a habilidade de configurar por completo os materiais em diferentes formas, torna-se possível, sem ou com poucos custos materiais, alterar e reconstruir tanto estruturas permanentes como temporárias”*. Outros projetos deste grupo são o *Smart Dynamic Casting* [Figura 3.25] e o *Thin Folded Concrete Structures*, que integram parte da investigação de um processo que, em vez de depositar, faz a extrusão do material na vertical (Wangler et al. 2016), pretendendo, com isto, substituir os moldes de cofragem específicos na construção de formas complexas por moldes dinâmicos controlados por tecnologias de automação (Lloret Fritschi et al. 2017). Ainda no Gramazio Kohler Research, o projeto *Remote Material Deposition* mostra como o material é depositado de forma remota, ou seja, à distância. Através do controlo do ângulo e da pressão de um canhão, foram lançadas porções de betão para construir uma estrutura *in-situ*, livre dos constrangimentos do local de obra [Figura 3.25]. É pouco plausível que venha a ser utilizado para construir Arquitetura, mas demonstra que a tecnologia pode ser desenvolvida de forma personalizada para determinado projeto e, inclusivamente,

fazer parte do projeto: “as estruturas produzidas por este âmbito são menos constrangidas pelos parâmetros convencionais da fabricação robótica [...] resultando em morfologias únicas, que são a expressão direta [...] do processo, desenhando um novo cenário de Arquitetura de “materialidade digital” (Dörfler et al. 2014: 362).

Industrialização

Esta caminho da integração da FA na Arquitetura pode estar em vias de eclodir nos próximos anos, quer pela comercialização, quer pela sua utilização em massa. Este processo poderá ser alcançado pela maturação de algumas tecnologias, inclusivamente por parte de algumas empresas já descritas anteriormente, como a XtreeE, a Apis Core ou a MX3D, e, ao mesmo tempo, pela utilização de tecnologias de utilização genérica, por exemplo, para a produção de moldes ou componentes em metal. A ideia da industrialização da FA na construção foi, pela primeira vez, ambicionada pelo *Contour Crafting* (Khoshnevis et al. 2006). Contudo, este processo pode já ter sido iniciado pela empresa WinSun, em 2014, quando demonstrou a capacidade de produção em massa, através da construção de 10 casas num único dia. Os trabalhos da WinSun serão mais aprofundados adiante, no capítulo 4. Mais recentemente, em 2017, e pela primeira vez, uma empresa de produção líder mundial, a Sika, especializada em betão e outros materiais de construção, entrou na corrida ao desenvolver, segundo esta, um sistema ultra rápido para ser utilizado a uma escala industrial, descrito por Frank Höfflin, responsável pelo departamento de tecnologia, como “uma solução industrial competitiva” e que “imprime betão tão rapidamente, a baixo custo, e com precisão que pode ser utilizado em obras de construção”⁹. Outro exemplo, e este através da fabricação de moldes, é o *FreeFab*, que já está a ser utilizado efetivamente na construção de uma obra em Londres, o qual será mais aprofundado no capítulo 4.

⁹ A citação foi retirada da página na internet de apresentação da tecnologia desenvolvida pela Sika, disponível em: https://www.sika.com/content/corp/annualreport/en/index_2017/topics/3d-concrete-printing.html



Figura 3.24 – Projetos desenvolvidos pelos alunos de Marta Malé-Aleman. “Are(a)na”, 2011 (esquerda); “Magnetic Architecture”, 2012 (centro); “Fluid Cast”, 2009 (direita).

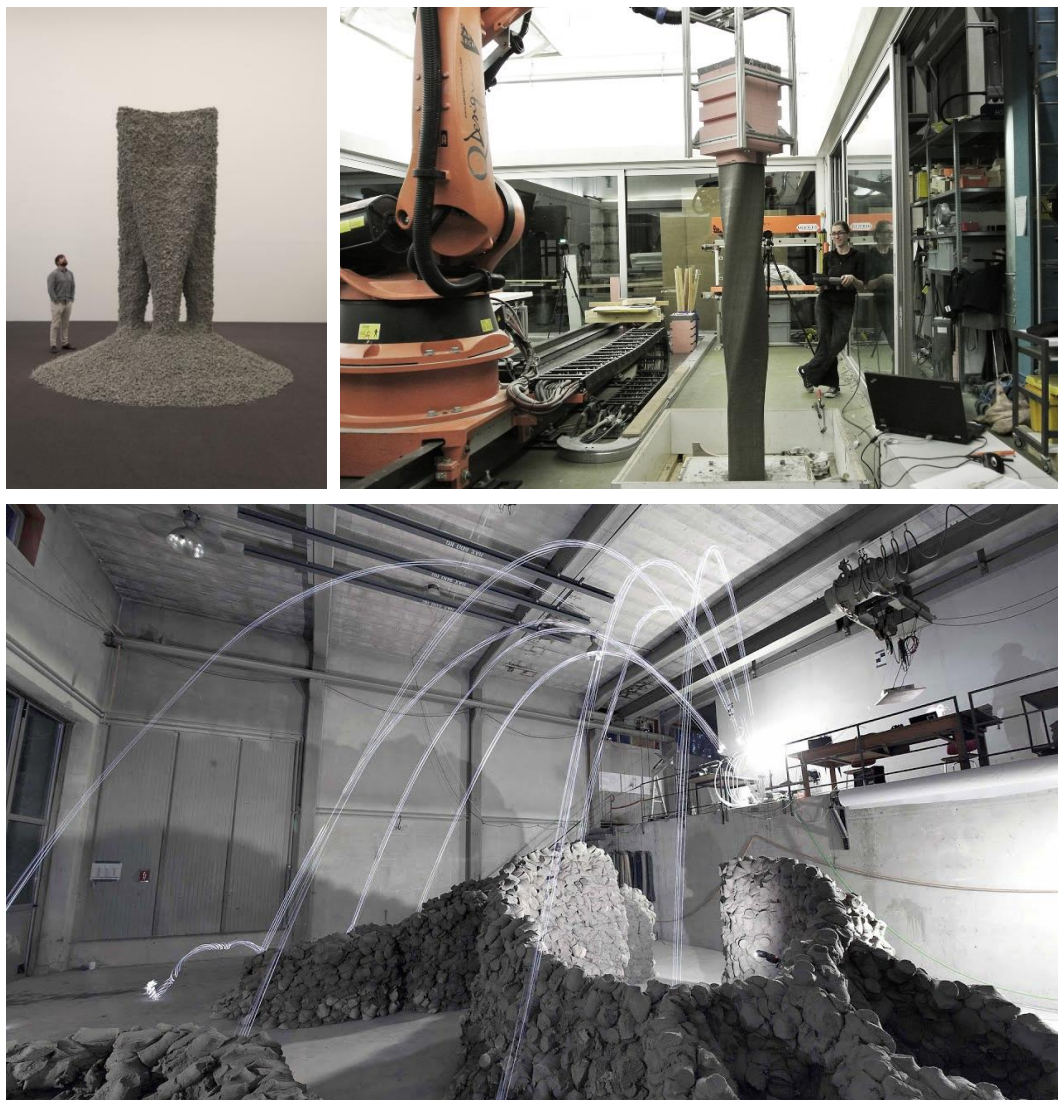


Figura 3.25 – Projetos desenvolvidos pelo grupo Gramazio Kohler Research, na ETHZ. “Rock Print”, 2015 (em cima, esquerda); “Smart Dynamic Casting”, 2015 (em cima à direita); “Remote Material Deposition”, 2014 (em baixo).

Capítulo 4

Oportunidades Emergentes

Baseado na consolidação e desenvolvimento recente da tecnologia de Fabricação Aditiva na construção e na Arquitetura, este capítulo procura demonstrar a importância do estudo destes métodos e as eventuais oportunidades decorrentes da aplicação das características da tecnologia na Arquitetura.

Segundo Deplazes (2008), a sequência da construção é uma cadeia aditiva, do mais pequeno para o maior, em que o objeto da Arquitetura - o edifício - é gerado com base em dois momentos: a estrutura e o processo. Por estrutura entende-se todos os elementos que constituem um edifício, enquanto que o processo é a junção do projeto (conceptualização e comunicação) e da produção (processos logísticos, operativos, fabricação). Assim sendo, as oportunidades da FA serão demonstradas através um conjunto de projetos selecionados para ilustrar a variedade de aplicações em Arquitetura, tais como: as diferentes fases de conceção de uma obra de Arquitetura (processo e construção); as diferentes escalas (reduzida e real); a função (representação, estrutura, estética); a finalidade da peça produzida (molde, peça final); o nível de intervenção na obra (total, parcial); entre outras, abrangendo três dimensões da Arquitetura: a *Representação*, a *Construção* e a *Materialidade*. Complementarmente, algumas destas oportunidades também serão demonstradas através da *Experiência pessoal*, obtida pela investigação prática realizada no decorrer da presente dissertação.

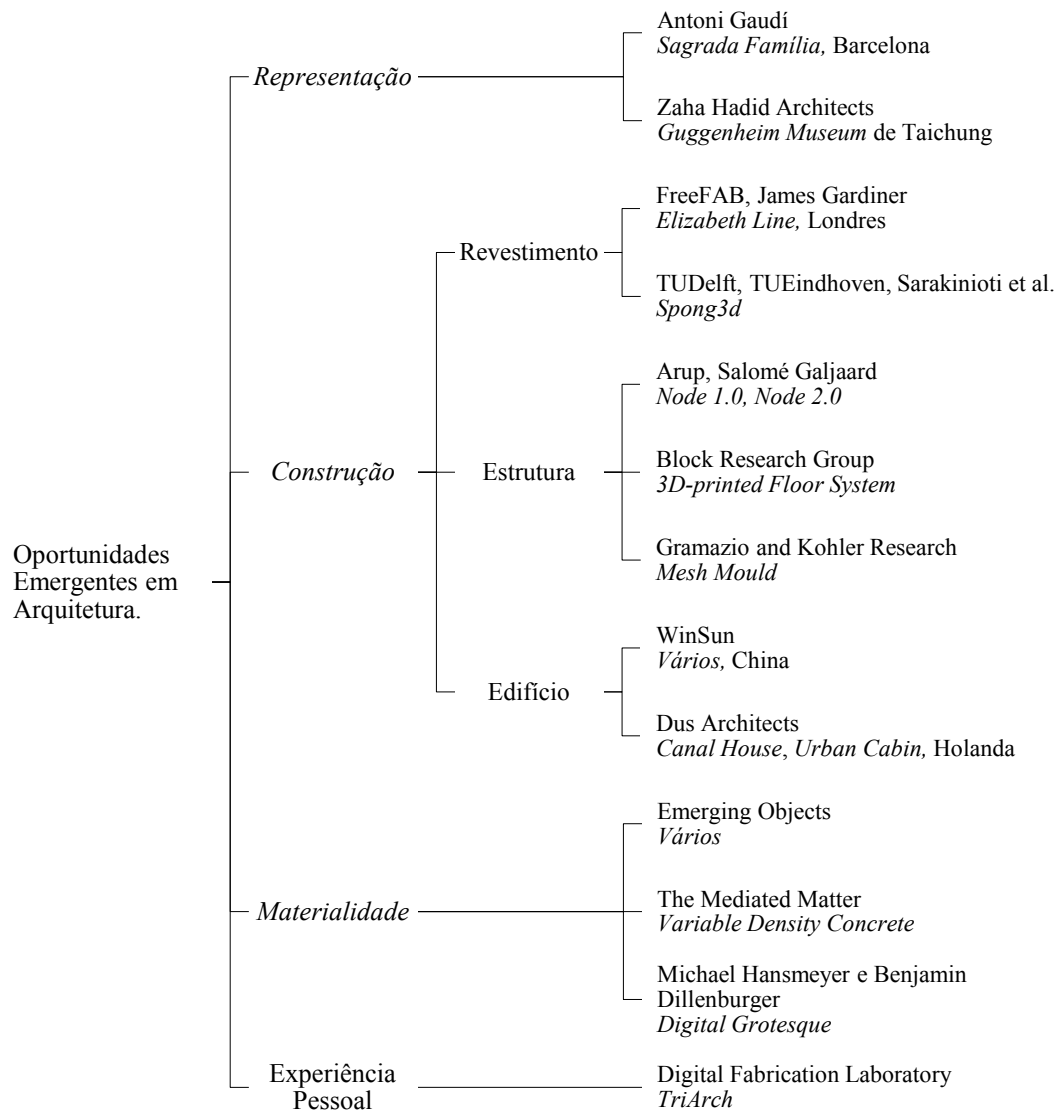


Figura 4.1 – Organograma da organização do capítulo e dos projetos que ilustram as Oportunidades Emergentes em Arquitetura.

4.1. Representação

Considerando a representação de Arquitetura através de maquetes, distinguem-se duas abordagens: por um lado, a materialização de maquetes difíceis de executar à mão, que encontra na FA uma solução, como se pode verificar no modelo para o projeto *Guggenheim Museum* de Taichung, do Zaha Hadid Architects; por outro lado, o modo como a FA pode ajudar na produção de várias maquetes de suporte ao processo de projeto de um edifício. Não se trata de ilustrar um projeto já definido, mas sim de considerar várias hipóteses ou ideias de projeto. O exemplo do projeto e construção da *Sagrada Família*, de Antoni Gaudí, mostra como a FA pode intervir neste campo.

Antoni Gaudí

Sagrada Família, Barcelona

Antoni Gaudí viveu num período de transição na Arquitetura, da Beux-Arts do século 19 ao Modernismo com início no século 20. A construção da catedral da *Sagrada Família*, provavelmente o edifício mais icónico da autoria de Gaudí, começou em 1882, com um prazo de conclusão de 130 anos. Contudo, a sua construção sofreu inúmeros entraves, tendo as obras parado, pela primeira vez, em 1936, com o início da Guerra Civil Espanhola, após a qual foi destruído um número significativo de modelos e documentos originais. Após a Guerra, e durante vários anos, os problemas de financiamento e de interpretação do projeto, aliados à falta da documentação que havia sido destruída, desencadearam vários atrasos das obras, alimentando a dúvida constante sobre a sua conclusão. Foi neste estado de ruína e de obra inacabada que a catedral acabou por se tornar, durante vários anos, numa parte identitária da cidade de Barcelona (Zerbst 1991).



Figura 4.2 – Catedral da Sagrada Família em construção. Vista interior da posição da rosácea na “Fachada de la Paixón”.

É reconhecido que Gaudí teve duas fases na sua carreira: a Historicista e a Modernista. A primeira pode ser identificada pela linguagem técnica consonante com as práticas tradicionais, assim como pela linguagem referente à época, bem patentes na *Casa Vicens*, *Collegi de las Teresianas*, *Bellesguard*. A segunda foi, provavelmente, a fase mais conhecida da sua carreira, com obras de grande notoriedade, como a *Casa Batlló*, a *Casa Milá* ou o *Parc Güell* (Burry, 2002). O tipo de construção era bastante exigente, embora a expressão das suas obras fosse sempre pensada segundo os métodos de construção tradicionais catalães. Mas, segundo Burry, existe ainda uma terceira fase na Arquitetura de Gaudí, que corresponde aos seus últimos 12 anos de vida, período em que projetou a *Sagrada Família*. Esta fase é descrita pelo autor como *"uma abordagem racional para resolver a complexidade formal a partir do uso de superfícies*

regradas como auxílio à descrição e documentação do edifício" (Burry, 2002: 314). Neste projecto, Gaudí optou por utilizar superfícies regradadas (helicoides, hiperbólicas, parabolóides) mais fáceis de construir, contrariamente ao que fizera na casa *Milá*, cuja utilização de superfícies lisas resultou em custos muito elevados. É nesta fase que Gaudí se torna realmente modernista, quase que vislumbrando o que seria a construção no futuro e a introdução de tecnologias de construção na Arquitetura. Assim, o que melhor caracterizou o seu trabalho nessa fase foi a criação de um modo de operar, quase como um guião, que dá instruções de como prosseguir o seu trabalho. Afinal, Gaudí estava ciente de que a igreja não estaria construída até a sua morte, assegurando, assim, que a obra pudesse ser concluída (Burry, 2002).

A combinação destes fatores permitiu aos investigadores interpretar das intenções de Gaudí, a partir do estudo póstumo das representações do seu trabalho. A visão moderna do projeto da catedral foi mote de investigação ao longo de vários anos. A equipa de projeto teve de compreender o sistema criado por Gaudí, tendo como ponto de partida o restauro e organização dos elementos originais que sobreviveram à guerra civil (maquetes, desenhos, fotos, documentos). A partir destes elementos, foi necessário desenvolver hipóteses para alcançar uma aproximação do que seriam as peças que se perderam, para produzir novos modelos e integrar as novas conclusões no conjunto do projeto da catedral para, então, poder planejar a sua construção. Durante muito tempo, todo este processo foi feito com base em métodos convencionais que tornaram todo o processo moroso, limitado no número de hipóteses a serem investigadas, aumentando, assim, os custos e o prazo de conclusão.

Jordi Faulí, Jordi Coll, e Mark Burry começaram a estudar a introdução de modelação paramétrica em 3D - *Catia* ou *Rhinoceros* -, para acelerar a compreensão do trabalho de Gaudí. A utilização da tecnologia de Fabricação Aditiva foi, então, introduzida no início dos anos 2000 (Burry, 2002). Como afirma Jordi Faulí: "*estes modelos não poderiam ser produzidos antes, primeiro por razões técnicas - avanços na capacidade computacional, digitalização 3d precisa do edifício existente, e prototipagem em 3d permitiu a nós trabalhar a uma escala e a um nível de detalhe até então impossível*" (Ian 2014) e ainda "*se Gaudí estivesse vivo hoje, teria levado a tecnologia 3D ao seu expoente máximo, visto que muito de seu trabalho era já concebido tridimensionalmente*"¹. Posto isto, e após ter assumido a liderança do projeto, o arquiteto Jordi Faulí anunciou um novo prazo para a conclusão da obra, que seria em 2012, antecipando, assim, a data até então prevista, ou seja, 2026, o ano do centenário da morte de Gaudí.

¹ A citação foi retirada da página na internet da empresa 3D Systems, fornecedora das máquinas de FA no projeto da *Sagrada Família*, disponível em: <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/sagrada-familia-color-jet-printing-cjp-helps-architects-sagrada-familia>



Figura 4.3 – Maquetes produzidas na oficina da Sagrada Família em Barcelona. As duas máquinas de FA que produzem as maquetes em gesso (em cima); Pormenor de uma hipótese para uma escadaria (em baixo).

A tecnologia de FA foi, pela primeira vez, introduzida no projeto aquando do desenvolvimento da rosácea na *Fachada de la Pasión*, [Figura 4.3, Figura 4.4]. A combinação das tecnologias de desenho digital, FA e sistemas de comunicação serviu para testar um método de cooperação apropriado para um grupo de trabalho globalmente disperso, que integra investigadores do projeto na Austrália e fabricantes de componentes na Galiza, estando a construção da catedral a acontecer em Barcelona (Burry et al. 2001). Desta primeira experiência da utilização de FA resultaram modelos muito detalhados, extremamente caros e morosos, decorrentes da tecnologia existente naquela época, tendo-se optado, então, por técnicas manuais (Burry et al. 2001).

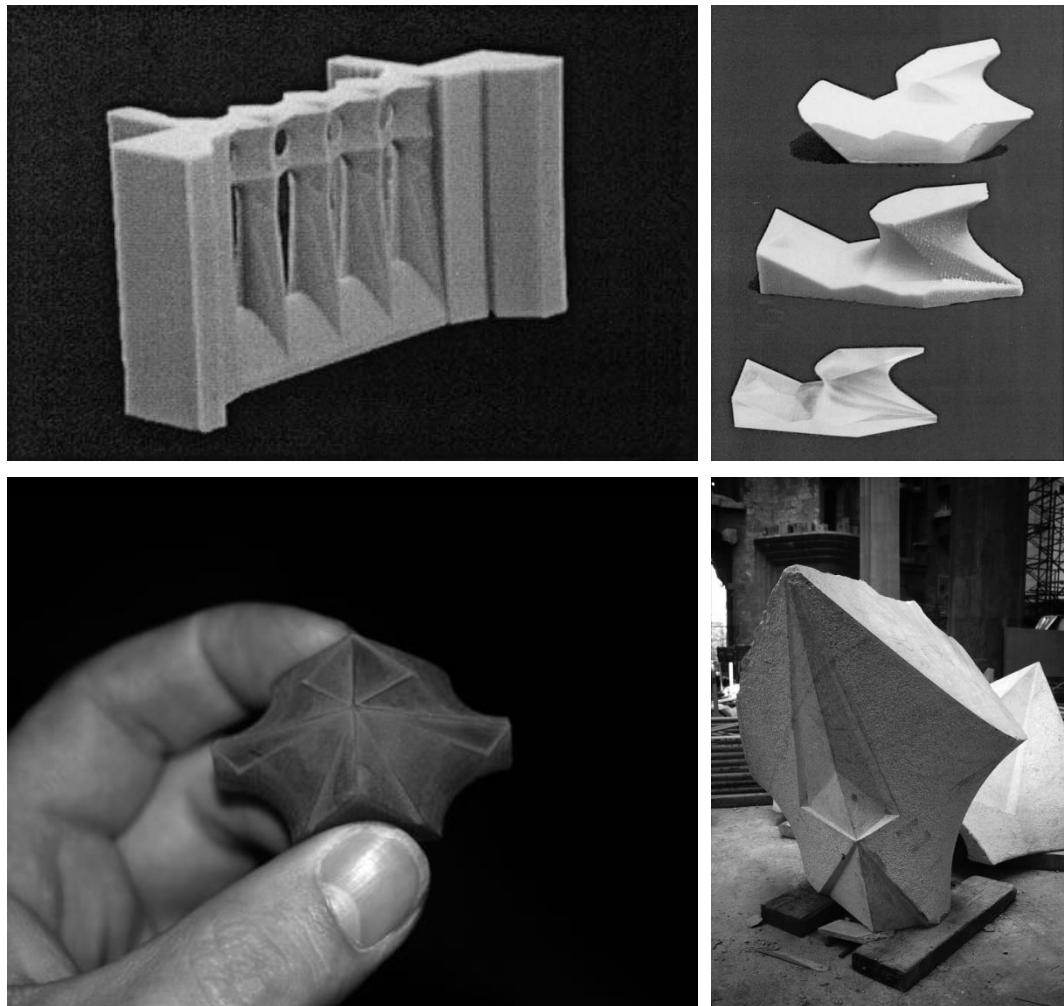


Figura 4.4 – Primeiras experiências com FA na produção de maquetes. Maquete da rosácea na “Fachada de la Pasión” (em cima, esquerda); Experiência comparativa entre técnicas de deposição de cera e Estereolitografia (em cima, direita); Peças individuais da rosácea da “Fachada de la Pasión”, maquete produzida por FA e peça em pedra no local de obra, respetivamente (em baixo).

Mais recentemente, e com o desenvolvimento da tecnologia, a FA tem-se revelado uma ferramenta bastante útil. A materialização direta dos estudos alcançados pelos modelos digitais e a sua elevada precisão e detalhe - importante na confirmação dos modelos - permitem aos investigadores concentrar mais tempo na pesquisa, libertando-os da construção de modelos que requerem grande perícia manual [Figura 4.3, Figura 4.5.] Cada modelo leva aproximadamente 12 horas a ser produzido, num material similar ao que foi utilizado por Gaudí nos modelos originais (o gesso), que, depois da fabricação, permite fazer alterações ou acabamentos. Esta tecnologia é considerada como um dos sistemas mais económicos, que utiliza jatos de tinta sobre camadas de pó (Celani e Orciuoli 2008) do tipo *Binder Jetting* [Figura 4.3]. Contudo, o processo é, ainda, relativamente lento, estando disponíveis duas máquinas para permitir a produção de modelos em simultâneo. Estas máquinas permitem fabricar modelos com dimensões de 20 cm x 25 cm x 20 cm, sendo necessário fracioná-los para poderem ser produzidos e montados, posteriormente, em maquetes que podem atingir 1,20 metros de altura e com diferentes escalas, desde a 1:200 até à 1:25 (Celani e Orciuoli 2008). Este processo, por ser modular, permite também rever o projeto pelo todo e pela parte, podendo ser alterada cada uma das secções individualmente. Outra das técnicas adotadas para acelerar o processo em modelos maiores e com desenho repetitivo é a produção por FA de um dos módulos do conjunto, que, por sua vez, serve de positivo para fazer um molde para a produção das peças em gesso (Celani e Orciuoli 2008).

Os vários modelos produzidos por FA ajudaram a acelerar a compreensão da geometria complexa deixada por Antoni Gaudí, possibilitando a sua materialização com todo o detalhe e a uma escala reduzida, podendo assim antever, com toda a precisão, como será o futuro edifício da Sagrada Família. A utilização desta tecnologia resultou em modelos melhores e mais precisos, tendo em conta o nível de detalhe, mesmo tratando-se de uma solução mais rápida; possibilitou a produção de modelos a escalas inferiores a 1:25; diminuiu a margem de erro; e permitiu uma melhor comunicação entre as especialidades e um menor consumo material².

² Informação retirada da página da internet da empresa 3D Systems, fornecedora das máquinas de FA no projeto da *Sagrada Família*, disponível em: <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/sagrada-familia-color-jet-printing-cjp-helps-architects-sagrada-familia>



Figura 4.5 – Oficina de maquetes e maquetes da “Sagrada Família” de Barcelona.

Zaha Hadid Architects

Guggenheim Museum de Taichung

Após a compreensão da utilidade que a Fabricação Aditiva pode ter durante uma fase de projeto, enquanto ferramenta para desenvolver hipóteses, melhorar a perceção do projeto e libertar o arquiteto da execução de modelos físicos durante a fase de processo, o próximo exemplo serve para demonstrar que esta tecnologia também pode ser utilizada para a apresentação final de projetos, no que concerne à construção de modelos rigorosos e de grande complexidade geométrica.

Para o efeito, foi escolhido um modelo de uma obra não construída do Zaha Hadid Architects, gabinete que é conhecido pela utilização de desenhos heterodoxos na sua Arquitetura. Ora, este projeto surge numa fase de transição da Arquitetura do gabinete, devido à consolidação da utilização das ferramentas digitais, de modelação tridimensional, no processo de projeto. Este é um dos projetos que “*demonstra o impacto crescente dos novos programas de modelação e animação 3D no desenvolvimento de uma nova linguagem arquitetónica*” (Schumacher 2004: 30). O projeto do *Guggenheim Museum* de Taichung (2003-06) surge depois de uma geração de projetos marcantes, como o *Terminus Multimodal Hoenheim Nord* (1998-2001), o *MAXXI* (1998-2009) ou o *Project Phaeno Science Center* (2000-05), que representavam no seu desenho uma intenção de movimento, dinâmica e fluidez. Tal como os anteriores, o projeto de Taiwan, também contempla estas características, visíveis não só na sua geometria, mas também no projeto propriamente dito, sobretudo na dinamização do percurso do visitante, como o átrio em bifurcação que cria uma câmara de entrada no exterior em continuidade com o espaço interior, onde flui uma sequência de rampas de circulação (Schumacher e Fontana-Giusti 2004). O dinamismo, neste projeto, é ainda acentuado pela ideia do *espaço de eventos em constante mudança*, através da utilização de elementos cinéticos de grande escala, que permitem variar radicalmente o arranjo dos espaços expositivos: “*a própria transformação pode tornar-se um espetáculo, visível na aparência exterior do edifício, criando assim uma sensação pública dentro do cenário urbano*” (Schumacher e Fontana-Giusti 2004: 108). Estas características do edifício servem, no fundo, para fundamentar o aspeto mais relevante deste projeto e que o distingue dos anteriormente citados, isto é, o facto de ser uma das primeiras demonstrações da “*crescente abordagem orgânica na articulação entre o espaço e a forma arquitetónica*” (Schumacher 2004: 30), que se começava a verificar nos trabalhos do Zaha Hadid Architects. A abordagem orgânica é alcançada por “*vários modos de ligação espacial, ao formular transições suaves na*

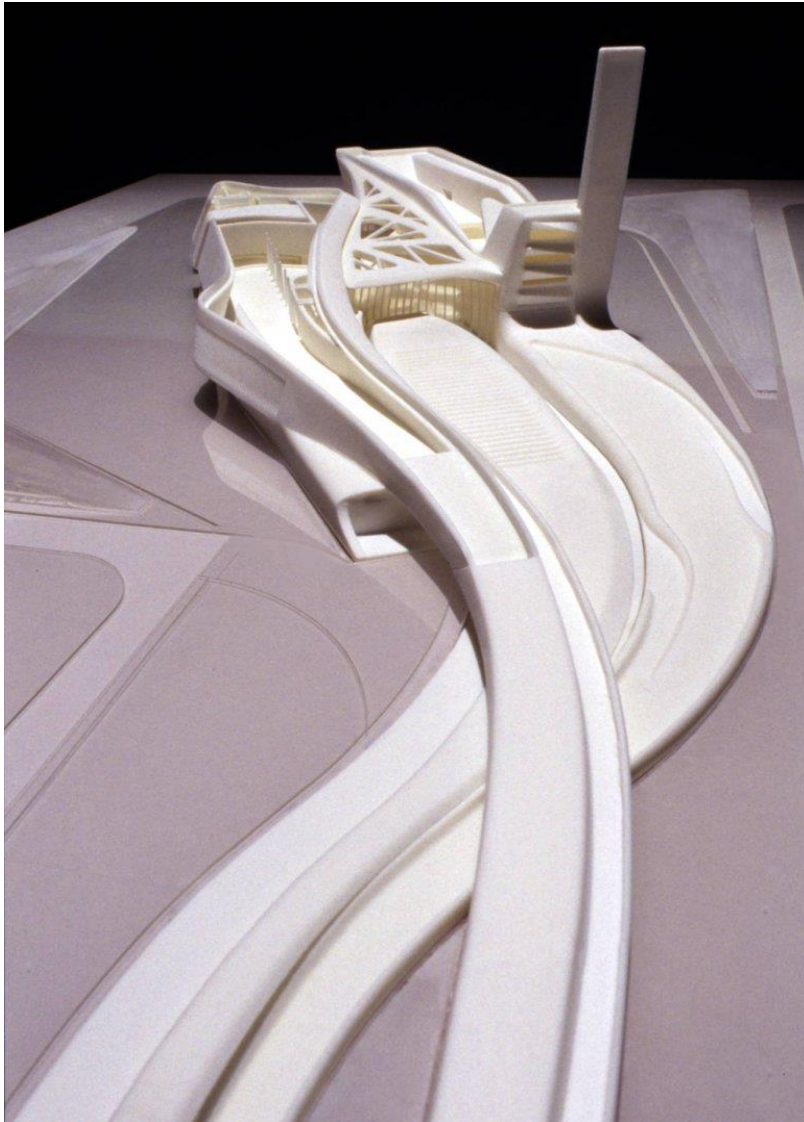


Figura 4.6 – Vista da maquete do “Guggenheim Museum” de Taichung.

fronteira entre as partes [...]. As partes são juntas para formar um todo orgânico que não permanece puro e indiferente, mas que se adapta mutuamente” onde “tudo se torna literalmente contínuo” (Schumacher 2004: 31).

Ora, do ponto de vista do tema da dissertação, a geometria complexa, proveniente desta abordagem orgânica contínua, é uma das grandes dificuldades na criação de modelos gerados pelas tecnologias digitais, ao mesmo tempo que é uma das grandes oportunidades da aplicação das tecnologias de FA na Arquitetura. Esta é uma das formas de condicionar o desenho desde a fase de projeto, ao libertar os arquitetos de constrangimentos de materialização das suas ideias, dando-lhes a oportunidade de explorar conceitos teóricos com total liberdade. Desta forma, para

o *Guggenheim Museum* de Taichung, foi produzido um *modelo final de projeto* (como visto no capítulo 3), com o propósito de apresentar e promover o projeto junto das instituições públicas locais. A solução passou por um modelo com mais de 2 metros de comprimento, produzido em plástico com a tecnologia do tipo *Power Bed Fusion* e que, para ser fabricado, foi dividido em várias partes, de acordo com as dimensões da máquina de FA, ou seja, 700 mm x 380 mm x 580 mm³. Esta tecnologia permitiu a construção integral da geometria complexa desta obra, inclusivamente alguns pormenores que seriam difíceis de alcançar por outros meios, por exemplo, as claraboias com um desenho orgânico, as rampas interiores do *lobby* [Figura 4.7] ou a representação do sistema móvel de controlo da luz na cobertura da galeria [Figura 4.8]. Segundo Dillon Lin, arquiteto envolvido no projeto, “quando é necessária precisão em formas complexas, a FA prova ser um processo económico para a produção de modelos quando comparado com outras opções mais caras, incluindo a produção manual, que é um trabalho extremamente intensivo”³.

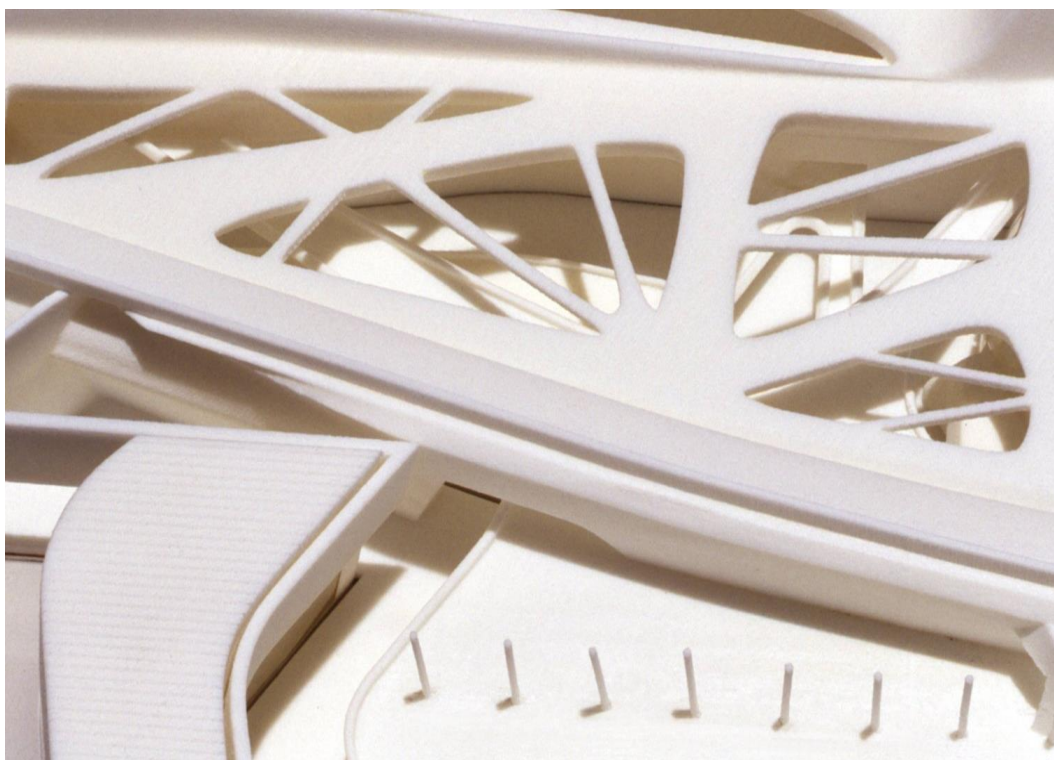


Figura 4.7 – Pormenor da maquete, onde é visível a claraboia e as rampas interiores.

³ Informação retirada da página na internet da empresa 3T RPD, responsável pela produção da maquete em FA, disponível em: <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/zaha-hadid-accurate-architectural-model/>

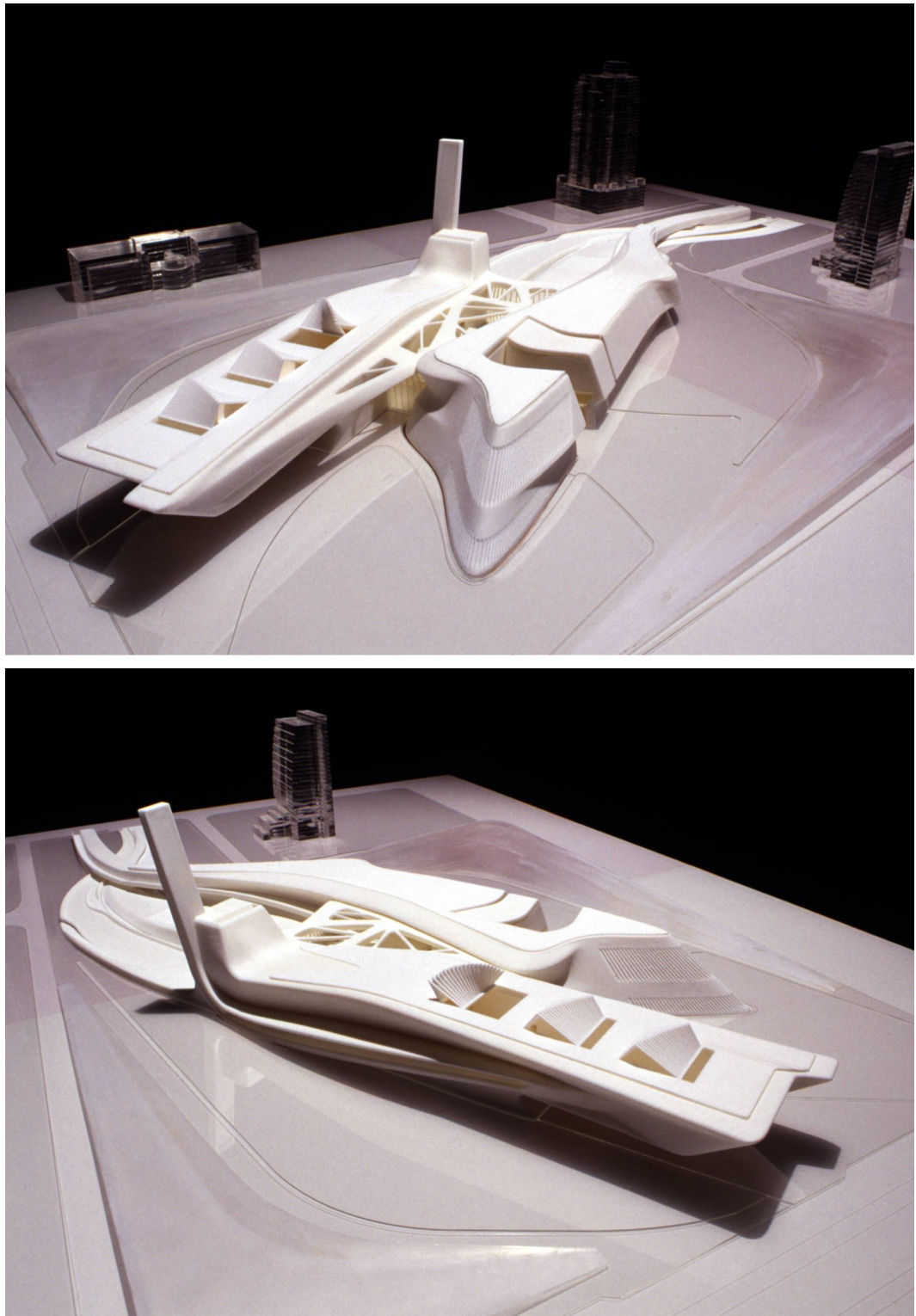


Figura 4.8 – Maquete do “Guggenheim Museum” de Taichung.

Oportunidades

Os dois projetos apresentados serviram para ilustrar alguns dos aspetos em que a FA pode intervir, concretamente no campo da materialização e de maquetes em Arquitetura, destacando-se, no esquema seguinte, algumas das oportunidades verificadas:

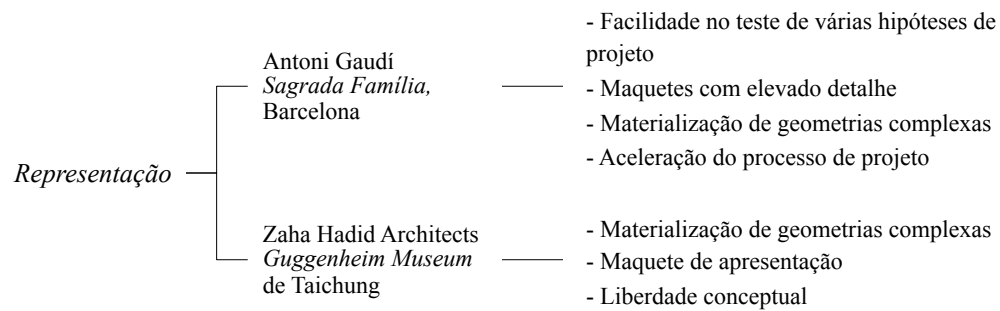


Figura 4.9 – Organograma das oportunidades da FA na fabricação de maquetes.

4.2. Construção

Na construção atual, a abordagem aditiva é o resultado da combinação de inúmeros componentes. Assim sendo, a Fabricação Aditiva pode trazer vantagens no campo da construção, simplificando os processos e, ao mesmo tempo, aumentando a complexidade geométrica dos elementos construídos. A utilização da FA em construção é possível, em virtude do desenvolvimento de algumas máquinas com capacidade de alcançar dimensões de produção maiores. No entanto, dada a natureza de alguns componentes utilizados na Arquitetura, como o tijolo, nem sempre são suficientemente grandes para serem produzidos por máquinas comuns. Como tal, neste subcapítulo irá ser abordada a intervenção desta tecnologia na construção, desde pequenos componentes pontuais até à construção quase integral do edifício, organizada da seguinte forma:

- *Revestimento:* Serão apresentados dois casos de estudo com diferentes intuitos na aplicação da FA para construção de componentes. O primeiro exemplo é a tecnologia *FreeFab*, desenvolvida pelo arquiteto James Gardiner, e que está a possibilitar a produção variável de painéis de revestimento. O segundo exemplo é o projeto académico *Spong3D*, que aborda o potencial da integração de várias funções num único elemento.
- *Estrutura:* Baseado em três projetos, este ponto irá abordar a aplicação da FA na construção de elementos estruturais, passando, primeiramente, pelo componente pontual variável de função estrutural, desenvolvido pela empresa Arup, depois pelas lajes desenvolvidas por Philippe Block e, por último, pela investigação *MeshMold*, que demonstra a consolidação de processos construtivos.
- *Edifício:* Neste tópico serão demonstradas construções quase integrais: primeiro, os edifícios da empresa chinesa WinSun, com o intuito de dar a conhecer não só a utilização da FA integrada nos processos atuais de construção, mas também a sua aplicação como um processo industrial; e segundo, o exemplo dos DUS Architects, que irá permitir a primeira abordagem arquitetónica já construída e influenciada pela FA.

4.2.1. Revestimento

FreeFAB, James Gardiner

Elizabeth Line, Londres

A fabricação de moldes para cofragem em betão é um dos trabalhos mais utilizados e exigentes na indústria da construção. Esses moldes são geralmente feitos em madeira ou placas metálicas, esferovite ou similares, fresados ou moldados em materiais flexíveis, como a borracha. Normalmente, numa obra com um carácter mais personalizado e geometricamente mais complexa, os materiais utilizados para a construção dos moldes não são reaproveitados, nem adaptados a outras construções. Por outro lado, tem a agravante de ser um dos trabalhos com maior exigência manual e que depende muito da técnica do executante, cuja complexidade afeta a viabilidade, o tempo e os custos. Nos casos da cofragem com recurso ao metal, é necessário produzir as peças, cortá-las e soldá-las, ou, no caso de materiais como o esferovite, é necessário fresar o material em bruto, bem como cuidar das superfícies finais para que não se leia no acabamento a passagem da ferramenta. Já no caso dos materiais plásticos e do silicone, é necessário criar um molde para fazer o próprio molde (Gardiner, et al. 2016). Os custos destes processos são elevados. Porém, estes são minimizados quando produzido um grande número de peças, com um único molde. Ora, esta prática é uma limitação para o desenho, tendo o arquiteto que optar por soluções mais homogêneas, que se adequem à padronização da construção. Neste contexto, o arquiteto australiano James Gardiner desenvolveu, durante três anos, uma técnica para produzir painéis complexos em betão e GRC, a partir de moldes (Gardiner 2014). O sistema FreeFAB Wax (FreeFAB, sem data) está a ser utilizado na construção da nova linha do metro Elizabeth, em Londres, sendo a maior construção em curso, de momento, na Europa, cujos 42 km de novos túneis subterrâneos constituem a maior expansão da rede central de Londres desde a Segunda Guerra Mundial⁴. A empresa Laing O'Rourke, responsável pela construção destas três novas estações, deparou-se com um projeto que apresentava curvas complexas, revestidas por painéis nas intercessões dos túneis dos acessos pedestres ao metro [Figura 4.10]. Tottenham Court Road, Bond Street e Liverpool Street são as estações que, ao todo, irão necessitar de 1400 moldes diferentes para obter um total de 36.000 painéis. Esta logística de produção, constituído por um conjunto tão grande de peças diferenciadas, é pouco ou nada exequível por meios de produção estabelecidos na indústria, sendo que tornariam a construção demasiado morosa, cara e exposta a incertezas.

⁴ Mais informação sobre o projeto da linha Elisabeth, encontra-se disponível em: <http://www.cross-rail.co.uk/news/crossrail-in-numbers>



Figura 4.10 – Imagens renderizadas do acesso às estações de metro da linha Elisabeth, onde é visível as placas de revestimento adaptadas à curvatura da superfície dos túneis.

Uma das formas encontradas para contornar as dificuldades de produção foi a aplicação da tecnologia da empresa FreeFAB, que utiliza a Fabricação Aditiva para facilitar a construção não *standard* de moldes. Esta abordagem passa por empregar a combinação de dois processos de fabricação, designadamente a FA e o processo subtrativo de fresagem. "[...] Ao utilizar a combinação de duas tecnologias [...] em que cada uma delas tem vantagens, as limitações próprias, inerentes, podem ser colmatadas pelos pontos fortes da outra parte" (Gardiner et al. 2016: 2).

O sistema da FreeFAB consiste num pórtico deslizante em carris, com um braço robótico acoplado que possui, na sua extremidade, uma ferramenta de extrusão ou uma fresa, e tem capacidade para produzir moldes com dimensões até 30 metros x 4 metros x 1.5 metros. A técnica é descrita por Gardiner et al. (2016) em cinco passos: primeiro, é utilizado a FA para produzir a peça base do molde, que depois é fresado para obter a forma e o acabamento final; em seguida, e a partir do molde, é feita a cofragem do painel com recurso aos métodos convencionais; depois da cofragem concluída, o conjunto (peça e molde) é colocado numa estação de reciclagem que irá fazer a desmoldagem ao derreter a cera; por fim, esta será reutilizada para os moldes seguintes. Ora, estes últimos passos são uma das razões pelas quais este método se diferencia dos demais, que normalmente reutilizam o molde. Neste caso, é a capacidade cíclica de reutilizar o material que permite a construção de peças diferentes umas das outras, com menor desperdício, ao invés de ter de viabilizar o molde pelo seu uso consecutivo [Figura 4.11]. Esta é também uma das formas de diminuir o custo de produção, um dos fatores que mais oneram a produção de moldes, pois os autores estimam que a quantidade de desperdício feito pela técnica FreeFAB na produção de um molde é de 1 litro, em comparação com os 312 litros da produção convencional (Gardiner, et al. 2016).



Figura 4.11 – Esquema ilustrativo do processo de produção e reciclagem dos moldes. (da esquerda para direita) deposição seletiva do material, fresagem do acabamento, projeção do GRC, remoção do molde para reciclagem da cera, peça final.

Por outro lado, esta técnica ultrapassa aquele que é apontado como um dos principais fatores limitativos da FA - o fator tempo/acabamento. Quando complementada com a técnica de fresagem, a superfície final na FA deixa de ser uma preocupação, uma vez que permite a utilização de grandes fluxos de material. Além disso, outro dos aspetos apenas permitido pela FA é o facto de o molde fabricado ser parcialmente oco. Desta forma, a combinação destes dois fatores, aliada ao facto de, na técnica de subtração, não ser necessário fresar um bloco inteiro, como acontece nos processos convencionais, mas apenas uma camada superficial de 5mm, torna o processo bastante rápido, sobretudo em peças de grandes dimensões. Neste processo, o tempo de produção estimado é de apenas 2,5 horas, muito inferior às 15,6 horas que, segundo alguns autores, demoraria por meio de métodos tradicionais (Gardiner et al. 2016).

O tempo, o desperdício e a redução de custos são os aspetos mais relevantes neste processo, em comparação com os métodos correntes. *“O custo de produzir um único molde para um único painel já não é proibitivamente dispendioso, o que liberta os designers e os engenheiros para acrescentar valor (funcional ou estético) onde antes estava fora do alcance”* (Gardiner et al. 2016: 6). Este fator representa uma redução de constrangimentos para quem projeta Arquitetura. É possível imaginar que tecnologias como esta possam permitir uma maior libertação do desenho e da capacidade criativa do arquiteto.



Figura 4.12 – Maquete à escala real para testar a solução construtiva.

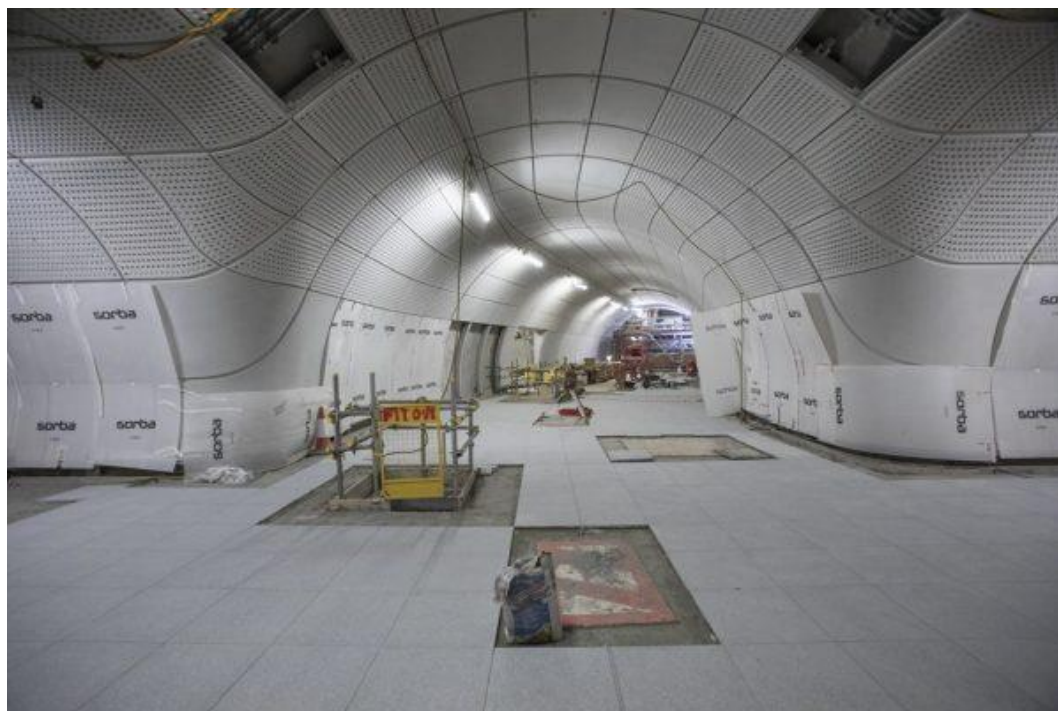


Figura 4.13 – Tuneis de acesso às estações em construção, onde é visível a colocação dos componentes de revestimento em GRC.

TU Delft, TUEindhoven, Sarakinioti et al.

Spong3D

O projeto *Spong3d* é um protótipo de painel de fachada otimizado para desempenhar funções de performance térmica. A Fabricação Aditiva tem a particularidade de poder produzir o interior de um objeto e, desta forma, permitir a integração de várias partes desenhadas para desempenhar múltiplas funções. Ao invés de uma parede normal composta por diversas camadas de materiais, em que cada qual desempenha uma função específica, esta consiste num único painel que integra vários mecanismos funcionais que permitem melhorar o comportamento térmico entre o interior e exterior de um edifício.

O revestimento exterior e de fachada é um dos componentes de maior complexidade na construção, devido à necessidade que tem de garantir o conforto e a proteção do ambiente exterior. Além disso, a preocupação crescente pelas questões ambientais leva à necessidade de encontrar soluções passivas e energeticamente eficientes para controlar a temperatura ambiente interna. Deste modo, a pele exterior de um edifício revela-se como uma das partes mais importantes na garantia de isolamento eficaz, onde os sistemas de climatização podem ser integrados (Sarakinioti et al. 2018a). É neste contexto que esta experiência foi realizada, explorando a utilização da tecnologia de FA e tirando partido das suas características para produzir um elemento para o revestimento de fachada capaz de integrar sistemas passivos de desempenho térmico. A capacidade de produção numa única etapa e a possibilidade de construir e desenhar o interior de um objeto permitiram a criação do protótipo de uma parede complexa com funções aumentadas.

Este protótipo consiste num “*painel de fachada que integra propriedades de isolamento com armazenamento de calor numa geometria complexa mono-material*” (Sarakinioti et al. 2018b: 275). Este sistema permite adaptar o seu comportamento térmico às diferentes condições ambientais, à variação de temperatura entre o dia e a noite ou às diferentes necessidades de regulação entre o Inverno e o Verão. Esta capacidade é alcançada através de um processo cíclico entre dois subsistemas que estão incorporados no painel: o primeiro é um interior celular parcialmente oco, com câmaras-de-ar que permitem isolamento térmico; e o segundo é um sistema de canais para a passagem de líquidos localizados nas faces exterior e interior do painel, permitindo o armazenamento adaptativo de calor. O líquido armazenado nos canais funciona como uma fonte de absorção e de descarga de calor, através de uma bomba. Essa bomba é colocada no interior ou no exterior, de acordo com as necessidades térmicas, agindo com um mecanismo

de arrefecimento, no Verão, e de aquecimento, no Inverno. Por exemplo, sempre que exista a necessidade de aquecer o interior do edifício, o líquido é colocado no exterior, durante o dia, para absorver o calor do sol, e transitado para o interior, à noite, para libertar o calor acumulado ao longo do dia. As simulações feitas a este sistema, num cenário de um compartimento de 12m², revelaram que este sistema pode corresponder até 50% das necessidades de arrefecimento no Verão e 70% das necessidades de aquecimento no Inverno (Sarakinioti et al. 2017). O protótipo foi feito com base na tecnologia do tipo *Material Extrusion*, com transparente PETG, um material com baixa condução térmica e reciclável. O protótipo final demorou 512 horas a ser produzido e tem a dimensão de 1500x500x360mm. Todavia, devido às limitações das dimensões de fabricação, foi produzido em dois componentes [Figura 4.15]. Este projeto serviu também para testar o desenho para o processo de produção, de forma a otimizar a relação entre o desempenho térmico, o desempenho estrutural e as restrições de fabricação e tempo de produção (Sarakinioti et al. 2018a).

Este projeto é ainda algo especulativo e experimental, embora apresente algumas das características mais interessantes da FA, designadamente a capacidade de integração de sistemas funcionais que, neste caso, têm a capacidade de otimizar não só os componentes produzidos, mas também de influenciar o meio em que estes se inserem, tornando os edifícios mais confortáveis e eficientes.

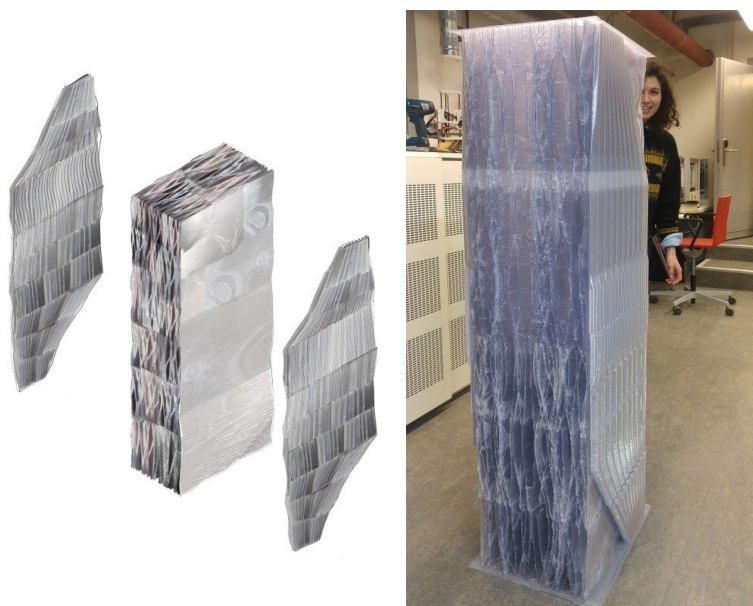


Figura 4.14 – “Spong3D”. Representação ilustrativa do sistema composto por três partes (esquerda); Protótipo à escala real produzido por extrusão de plástico.

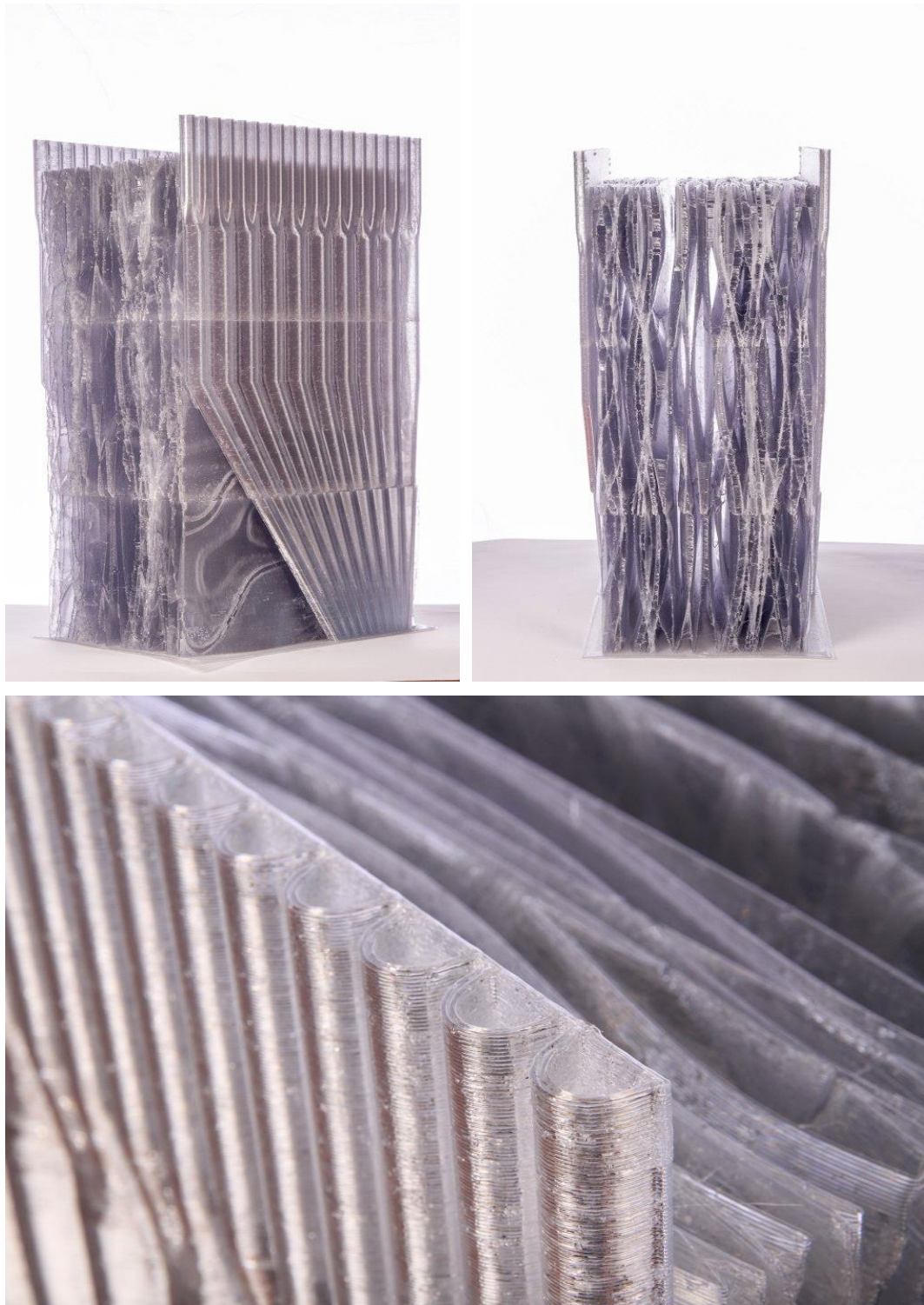


Figura 4.15 - “Spong3D”. Módulo da parede, onde é visível o sistema de distribuição material com função isolamento, no interior, e os canais de transmissão de calor, no exterior (em cima); Pormenor do componente, em que possível ler o processo de produção e a utilização de um único material (em baixo).

4.2.2. Estrutura

Arup, Salomé Galjaard

Node 1.0, Node 2.0

Contrariamente aos projetos anteriores, em que a FA servia para produzir componentes de revestimento, o próximo exemplo recorre à tecnologia para a produção de módulos estruturais. O projeto liderado por Salomé Galjaard, desenvolvido numa das maiores empresas mundiais de engenharia e construção - a Arup, surgiu como resposta à construção de uma estrutura de tensividade para a cidade de Haia [Figura 4.16]. Este tipo de estruturas caracteriza-se por um conjunto de elementos isolados que, por tração contínua, alcançam um equilíbrio entre si. No caso deste projeto, a solução consistia num conjunto de postes independentes, dispostos em ângulos diferentes e interligados por uma rede de cabos tensionados. A instalação, que não chegou a ser construída, tinha o propósito de ser usada como uma fonte de iluminação (Galjaard et al. 2015).

Desta forma, a Arup partiu da necessidade de encontrar uma solução mais eficaz e rápida, comparativamente aos métodos tradicionais, para a fabricação das juntas nos postes que recebem os cabos. Atendendo ao desenho irregular da estrutura, todas estas juntas são diferentes entre si, traduzindo-se em 1.200 variações de ângulos. Consequentemente, tal como visto no exemplo anterior, a produção de um conjunto tão grande de peças variadas por meios convencionais requer um elevado número de processos e trabalho manual intensivo (Galjaard et al. 2015), resultando em custos económicos, tempo de fabricação e número de operários acrescidos. Por sua vez, o modelo da junta tradicional seria algo simplificada, constituída pela conexão de 6 placas de aço cortadas de forma mecânica e soldadas manualmente com diferentes ângulos, ficando com um peso total de 20 kg [Figura 4.16] (Ren e Galjaard 2015). A solução alcançada passou, então, por utilizar a combinação de duas tecnologias: o recurso a métodos de desenho de otimização topológica e a produção através da tecnologia de FA.



Figura 4.16 – Projeto da estrutura de tensegridade. A estrutura integral (esquerda); Junta projetada para fabricação por meios convencionais (direita).

Na Natureza encontramos evidências da completa integração entre forma, material e estrutura, otimizados ao longo de milhões de anos por evolução natural, adaptando-se ao ambiente em que se inseriam (Ren e Galjaard 2015). Deste modo, o processo de otimização topológica foi testado nas juntas da Arup, resultando numa forma orgânica derivada do seguimento do fluxo das forças exercidas na estrutura. A solução proporcionou um uso mais eficiente do material, sendo, no entanto, preservadas as suas características estruturais. O componente, após ter sido desenhado uma primeira vez com os parâmetros de otimização estrutural, foi novamente otimizado para integrar o processo de fabricação, tornando-o, assim, mais rápido e menos oneroso, uma vez que reduz o trabalho de pós-processamento, como a remoção de suportes ou necessidade de acabamentos finais (Galjaard et al. 2015). Ao todo, foram desenvolvidos dois protótipos - o *Node 1.0* e o *Node 2.0* -, ambos em metal, com a tecnologia de FA do tipo *Powder Bed Fusion*.

O *Node 1.0* foi o primeiro componente produzido por este processo, resultando numa redução de peso, em relação ao componente tradicional, de 30%, ou seja, de 20kg para 14 kg (Ren e Galjaard 2015). Por sua vez, o *Node 2.0*, com base na experiência anterior, sofreu melhorias no desenho da junta tornando-a mais compacta, pequena e leve, de modo a obter um desempenho estrutural mais eficiente em toda a instalação [Figura 4.18]. Assim, o *Node 2.0* é 75% mais leve do que a junta tradicional e 40% mais leve que o *Node 1.0*, uma vez que, para além da otimização, contempla também a integração do sistema das conexões dos cabos que, na peça original, teriam de ser colocadas posteriormente. Por sua vez, a instalação total sofreria uma redução da tensão nos cabos em 20% [Figura 4.17] (Galjaard et al. 2015).



Figura 4.17 – Juntas desenvolvidas pela Arup. Comparação entre o as três juntas: tradicional, “Node 1.0” e “Node 2.0” (em cima); Pormenor da distribuição material no “Node 1.0”.



Figura 4.18 – “Node 2.0” inserido com os restantes elementos, os cabos e os postes.

Mais recentemente, foi testado também a utilização da FA de *Binder Jetting* em areia que, em vez de ter sido utilizada para produção da peça final, serviu para a fabricação do molde para fundição em metal. Este método tem a vantagem de ser mais económico do que a fabricação direta em metal e é mais fácil de obter certificação para determinadas aplicações, pois os componentes acabam por ser produzidos mediante um método corrente [Figura 4.19] (Niche 2017).

O custo da utilização da FA é, ainda, bastante elevado em comparação com a construção por métodos tradicionais. Contudo, tomando este projeto como exemplo, existem algumas vantagens que, somadas, podem equilibrar a balança entre estes métodos de construção, e concretamente: a integração de conexões que teriam de ser posteriormente colocadas; a automação e geração paramétrica dos modelos variáveis; a redução de mão-de-obra e de possíveis falhas humanas nas peças produzidas; a redução de transporte e armazenamento, podendo ser fabricada próximo do local de instalação; os ganhos estruturais; e a eficiência material, aproximando-se, assim, do princípio - a forma segue a função. Para os autores do projeto, embora não seja uma solução imediata, este estudo do revela alguns benefícios significativos da utilização de FA, podendo vir a ter um grande impacto nas técnicas de construção, defendendo, consequentemente, a necessidade de continuação da investigação nesta área. “Se alcançarmos mais provas de uma aplicação segura desta técnica de produção, acreditamos que poderá alterar a forma como projetamos. Não apenas ao nível estrutural, mas para os edifícios e para a Arquitetura como um todo” (Galjaard et al. 2015: 15).



Figura 4.19 – Moldes em areia, produzidos por FA, para produzir as juntas otimizadas por fundição em metal.

Block Research Group

3D-printed Floor System

O exemplo anterior utilizava a FA para produzir elementos estruturais que influenciavam pontualmente uma estrutura. Por sua vez, no exemplo que se segue, encontramos uma abordagem distinta, em que a utilização da tecnologia facilita a construção de elementos compostos por vários componentes numa estrutura contínua que, na construção convencional, são feitos num elemento único e pouco otimizado, como é o caso de uma laje. Esta investigação foi levada a cabo pelo Block Research Group, um centro de investigação da ETH de Zurique, fundado por Philippe Block, que revisita técnicas e referências históricas e, com tecnologias contemporâneas que vão desde a robótica à Fabricação Aditiva, desenvolvem novos métodos para estruturas de forças distributivas compostas por um grande conjunto de elementos individuais, por exemplo, no caso de uma abóbada. Só com a geometria dos módulos (como tijolos ou pedra) é possível erguer uma estrutura sem que esta tenha elementos estruturais, ligações mecânicas ou argamassa nas juntas, podendo, assim, eliminar vários processos (como moldes de cofragem), simplificar detalhes construtivos, possibilitar a construção de estruturas mais leves e eficientes ou,

ainda, utilizar materiais mais fracos e comuns (Block et al. 2017). Por outro lado, os elementos que compõem esta estrutura podem ser otimizados com o auxílio da tecnologia, reduzindo o material necessário, e incorporar uma geometria que controle melhor a descarga de forças.



Figura 4.20 – Lajeta abobadada produzida por um conjunto de processos convencionais.

O projeto em causa foi baseado num sistema de finas lajetas abobadadas que trabalham à compressão, e que no topo contêm uma série de arcos transversais que permitem suportar o chão transmitindo as forças para os arcos. Em vez de uma laje maciça, este sistema resulta num piso mais leve e rígido. O conceito teve uma longa tradição no Mediterrâneo e nos Estados Unidos, no século 19, e foi desenvolvido com várias técnicas exploradas por Rafael Guastavino. Este sistema foi investigado pelo Block Research Group e construído um protótipo com processos manuais na Etiópia, originando, posteriormente, a investigação de um sistema de lajetas otimizadas produzidas com recurso a tecnologias de fabricação digital (López et al. 2014). Estas lajetas revelaram um grande potencial de redução de material, em que a lógica de compressão permitiu um elemento sem reforço estrutural em betão, com apenas 2cm de espessura, necessitando de menos 70 % do material, comparativamente a uma laje convencional. O resultado foi uma estrutura mais leve que se traduz numa diminuição de cargas na estrutura total do edifício (vigas, pilares e fundações) (Liew et al. 2017). Contudo, o método de pré-fabricação deste sistema de geometria complexa é caro e requer um elevado número de processos de produção, limitando a variação em série para utilização como sistema modular [Figura 4.20](Block et al. 2017).

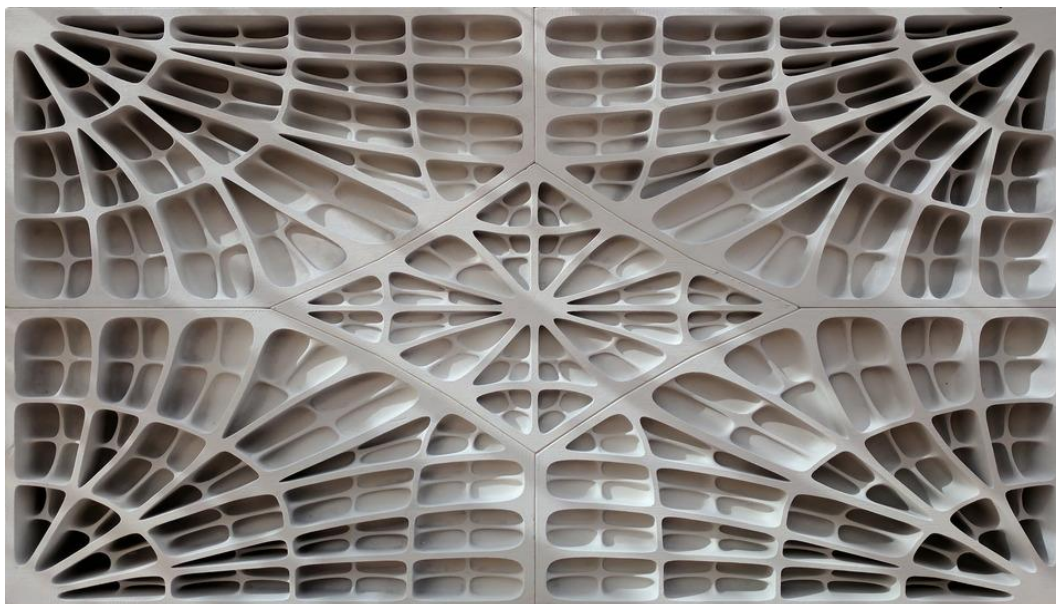


Figura 4.21 – Vista da face superior do sistema de lajetas, onde é visível a estrutura nervurada.

Assim, e verificando o potencial deste tipo de estrutura otimizada, optaram, então, por utilizar um método que pudesse produzir esta estrutura numa única etapa, sem a necessidade de moldes, tendo sido escolhida, para o efeito, a tecnologia de FA do tipo *Binder Jetting*. Para além da facilidade de produção, a FA permitiu, ainda, uma melhor otimização, (resultando numa rede nervuras funiculares hierárquicas [Figura 4.21]), assim como a produção variável de peças e integração no desenho de juntas macho-fêmea para garantir um alinhamento perfeito entre as lajes. Foram testados três componentes, com diferentes geometrias de nervuras, produzidos com uma dimensão de 2x1.4x0.16 [Figura 4.22] (Rippmann et al. 2018). Ainda que os materiais utilizados por esta tecnologia sejam relativamente fracos, neste sistema à compressão não constitui necessariamente um problema, já que pode vir a possibilitar a utilização de materiais ecológicos e recicláveis. Ora, além do menor uso material, este método pode reduzir significativamente a pegada ecológica da indústria da construção. Pisos como estes podem ser muitos mais leves, compactos e incluir funções integradas, (como por exemplo funções acústicas e eletrônicas), traduzindo-se em maior conforto e durabilidade. Este sistema pode também vir a ser utilizado como cofragem perdida em obra, eliminando a necessidade de estruturas de suporte para moldes de lajes (Block et al. 2017).



Figura 4.22 – Conjunto da laje. Protótipo, com cinco componentes, apoiado em quatro pontos (em cima); Junta macho-fêmea, sem ligação mecânica ou argamassas, entre os vários elementos.

Gramazio and Kohler Research

Mesh Mould

Em comparação com os projetos apresentados anteriormente, em que a Fabricação Aditiva era um meio para otimizar o elemento produzido, no caso do *Mesh Mould*, a tecnologia é a solução para um processo de construção mais eficiente, consolidando várias especialidades numa só. É neste âmbito que o Gramazio and Kohler Research, grupo de investigação da Architectural and Digital Fabrication na ETH em Zurich, tem vindo a explorar o impacto da fabricação robótica no desenho da Arquitetura e construção, procurando estudar um método de produção de elementos em betão mais eficaz. O betão é, atualmente, considerado o material mais utilizado na indústria da construção. Contudo, a sua utilização em obra está dependente de moldes e de reforço estrutural interno. Por isso, um típico processo de cofragem em betão envolve os seguintes processos: a fabricação do molde de cofragem; a produção dos varões de aço; o transporte desses elementos para o local de obra e correspondente logística, o que implica ajustar, colocar e conectar os varões; a instalação do molde; a deposição do betão; a descofragem; e finalmente, o acabamento da superfície. Todo este processo exige mão-de-obra intensiva que, para reduzir custos, é frequentemente adotada uma simplificação geométrica da construção final, sendo que o trabalho de montagem dos moldes e do reforço representa 50% dos custos de uma estrutura em betão (Hack et al. 2014a).

Cientes desta problemática, Gramazio and Kohler propuseram o sistema *Mesh Mould*, que combina o molde de cofragem com o reforço estrutural, simplificando-o num único processo automatizado, que requeira menos recursos, custos, matéria, sendo, no entanto, capaz de fabricar formas complexas (Hack et al. 2015). Eficiência, forma, economia e potencialização da capacidade maleável e plástica do betão foram os resultados alcançados com base na utilização da combinação de duas tecnologias: a deposição livre de material com a FA e um robô industrial que permitiu a versatilidade de movimentos [Figura 4.23].

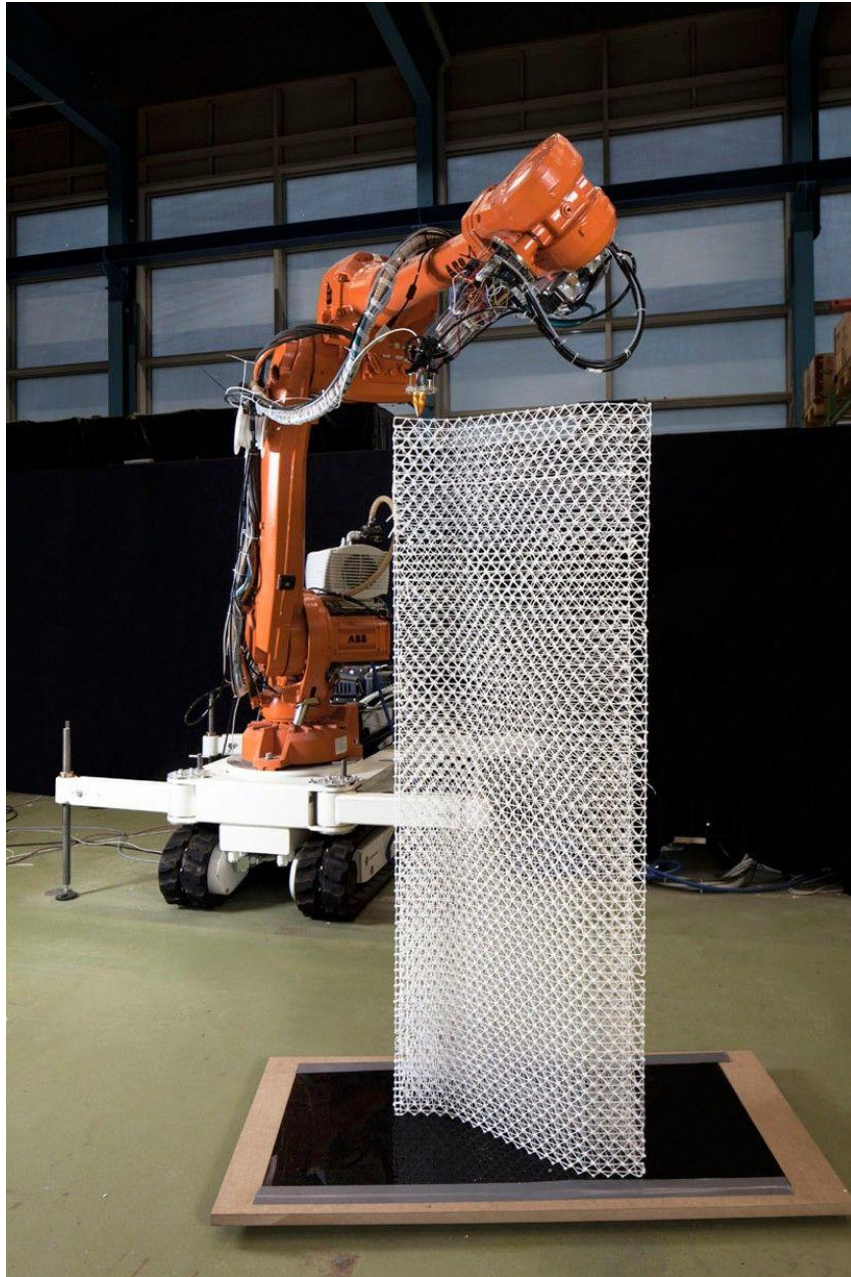


Figura 4.23 – Fabricação da malha tridimensional, por deposição espacial de plástico por um robô industrial capaz de operar in-situ.

A maioria das soluções de FA para construções em betão, onde é explorada a deposição do próprio material (Khoshnevis et al. 2006; Lim et al. 2012), resultam de processos bastante complexos, sendo necessário gerir a consistência do betão, a sua hidratação, o tempo de secagem e da deposição das camadas subsequentes, com a agravante de ser difícil a conjugação destes processos com reforço estrutural. Assim sendo, Gramazio and Kohler optaram por uma solução pragmática, utilizando polímero plástico (ABS) depositado de forma livre, numa estrutura de

malha tridimensional que, em comparação com as técnicas de deposição em betão, é uma solução muito mais simples, leve e limpa. Ora, é esta estrutura que servirá não só de reforço interior da peça, mas também de cofragem [Figura 4.24] (Hack et al. 2014a). Este método foi baseado no sistema de cofragem *leaking formwork*, criado por Danny Hill, que consiste em placas perfuradas por onde o betão é projetado entre os orifícios e, posteriormente, é dado manualmente o acabamento final com a passagem de uma espátula. Este sistema apresentou grandes vantagens, entre as quais simplicidade e eficiência material, demonstrando um grande potencial para robotização. Assim, em vez dos painéis pré-fabricados, a estrutura tridimensional em malha é projetada com betão e produzida com recurso à FA (Hack e Lauer 2014). Para o efeito, foi desenvolvida uma ferramenta customizada, de acordo com a categorização do primeiro capítulo, do tipo *Extrusion Material*, para extrusão com ABS, convencionalmente utilizado em máquinas *desktop* de FA. Para permitir a extrusão livre no ar, sem apoio contínuo comum nos métodos de camada sobre camada, este sistema caracteriza-se pela utilização de um diâmetro de extrusão de 3mm, superior ao convencional, e por um mecanismo de arrefecimento com ar para solidificação instantânea. A versatilidade alcançada, para além de se traduzir em liberdade formal, permite igualmente variar o padrão da malha, a abertura dos vãos e a espessura do filamento, podendo utilizá-la de acordo com as forças estruturais necessárias em determinada geometria ou adensar certas zonas no interior, impedindo que o betão chegue a todas as partes, para criar uma peça porosa, inalcançável por meios convencionais. Esta estrutura é eficiente, a ponto de representar apenas 2,5% do volume total da peça (Hack et al. 2014b). Ainda assim, este processo requer alguns melhoramentos, revelando alguma fraqueza estrutural em virtude do material utilizado e sofrendo algumas deformações quando o betão é projetado (Hack et al. 2015). Por isso, novos materiais terão de ser testados, por exemplo, compósitos de fibras de vidro carbono ou basalto, para garantir melhor comportamento estrutural (Hack e Lauer 2014).

A combinação de dois dos processos mais complexos - reforço e cofragem - pode simplificar e facilitar as construções em betão. E se assistido por processos de fabricação digital, esse método pode possibilitar maior complexidade formal, otimização estrutural, eficiência material, desbloqueando a produção de componentes em betão *non-standard*.

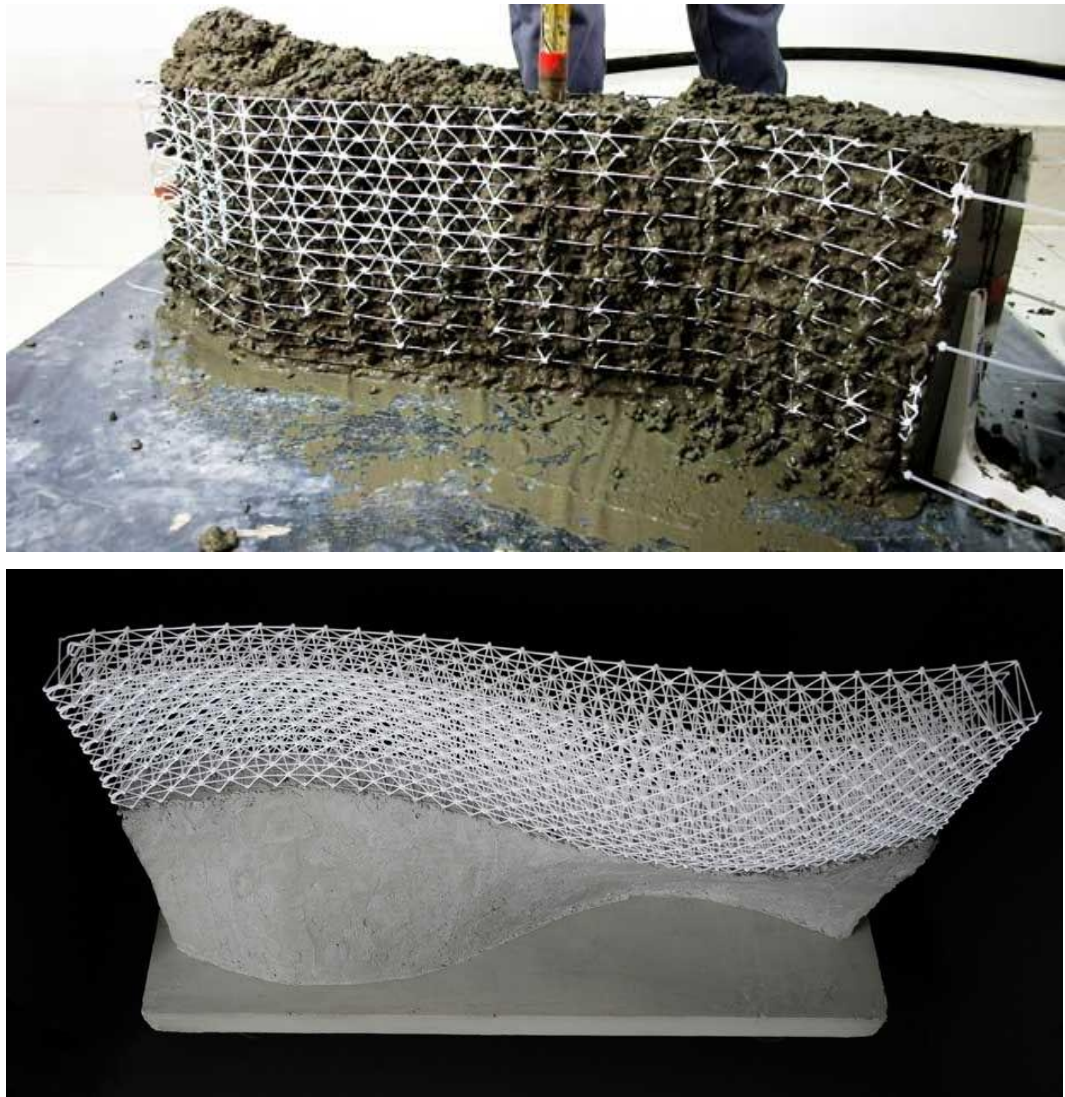


Figura 4.24 – Componente produzido. Projeção do betão por entre a malha, no qual é perceptível a ausência de molde de cofragem, numa geometria curva (em cima); Protótipo demonstrativo do componente (em baixo).

4.2.3. Edifício

WinSun

Vários, China

Várias soluções tendem a emergir à escala do edifício, conforme visto anteriormente. Contudo, a empresa WinSun Decoration Design Engineering Co. foi a primeira a conseguir, de facto, aplicar a tecnologia FA à construção de edifícios, utilizando esta tecnologia como um meio para a produção industrial de habitações. Ao contrário das soluções precedentes, com propósitos de investigação, esta empresa, sediada em Shangai na China, aborda a FA de uma maneira empresarial. Velocidade, eficiência e economia são os fatores com maior relevância, em detrimento das possibilidades arquitetónicas, espaciais e desenho de detalhes que seriam importantes explorar (Fischer 2016). No entanto, é de realçar não só a dimensão e escala alcançada, mas também as abordagens utilizadas, sendo mesmo, até a data, as maiores aplicações da tecnologia de Fabricação Aditiva, tanto na construção, como em todas as áreas.



Figura 4.25 – Processo de deposição de betão da empresa WinSun.

Nas suas construções, a WinSun já concretizou três abordagens de construção diferentes: a construção integral modular, a fabricação de elementos não estruturais e a fabricação de moldes de cofragem perdida. Em 2014, construiu-se, pela primeira vez, à escala do edifício. Foi, então, produzido um conjunto de 10 casas, cada uma delas com 200 metros quadrados em menos de 24 horas, com um custo aproximado de 3.600 euros cada uma [Figura 4.26] (Kira 2015). Estas casas foram produzidas inteiramente através da FA, com secções transversais parcialmente ocas (paredes, chão e cobertura de duas águas) fabricadas horizontalmente e, posteriormente, elevadas para a montagem no local de obra. Também, por este método foi construído o *Office of the Future*, em 2016, um edifício de escritórios enquadrado na estratégia de implementação da FA, no Dubai, com a pretensão de que esta tecnologia seja utilizada em 25% da construção neste país até 2030⁵. Já em 2015, a empresa construiu a primeira construção em altura, um edifício residencial de 5 andares [Figura 4.27]. Em simultâneo, construiu também uma vivenda de grandes dimensões, com 1.100 metros quadrados, que custou cerca de 120,000 euros e demorou cerca de um mês a construir por 8 operários, muito inferior aos 3 meses e às 30 pessoas que a empresa diz que seriam necessários pelos métodos tradicionais (Davison 2015). O objetivo deste projeto foi demonstrar que uma habitação de grandes dimensões construída por esta tecnologia já não representava um luxo inacessível. Nestes dois últimos casos, por terem mais do que um piso, os edifícios não foram produzidos por inteiro, mas sim num sistema construtivo misto, que combinava elementos pré-fabricados por FA com outros produzidos no local de forma convencional. Dado que as peças produzidas por este método apresentam fragilidades na união das camadas depositadas, parece ter sido utilizado a FA apenas em elementos como paredes e colunas (Fischer 2016). Para além desta técnica, a FA já foi usada como moldes reforçados com aço e preenchidos com betão, tal como os sistemas de cofragem correntes [Figura 4.28] (Wu et al. 2016). Não sendo uma tecnologia capaz de produzir elementos estruturais, parece haver, no entanto, claras vantagens em produzir elementos de cofragem perdida de forma automatizada.

Para construir estes elementos de grandes dimensões, a empresa desenvolveu uma máquina com 150 metros de comprimento, 10 metros de largura e 6,6 de altura, que fabrica objetos com base na técnica de extrusão (Wu et al. 2016). Para além da capacidade de construir elementos de grandes dimensões, a característica do material é também uma das tecnologias mais importantes. O material tem que endurecer muito rapidamente e, neste caso, demora cerca de 24 horas, não podendo encolher nem expandir demasiado a sua dimensão durante o processo de

⁵ Mais informação sobre o escritório no Dubai e sobre as iniciativas da Dubai Future Foundation, pode ser consultada em: <http://www.officeofthefuture.ae/>

secagem, para garantir força, estabilidade e homogeneidade ao construir camada sobre camada. Além disso, é necessário que o material esteja o suficientemente líquido para ser depositado.



Figura 4.26 – Casas pertencentes ao conjunto de 10 produzidas pela empresa WinSun em 24 horas, em 2014.



Figura 4.27 – Prédio com cinco andares construído em 2015.

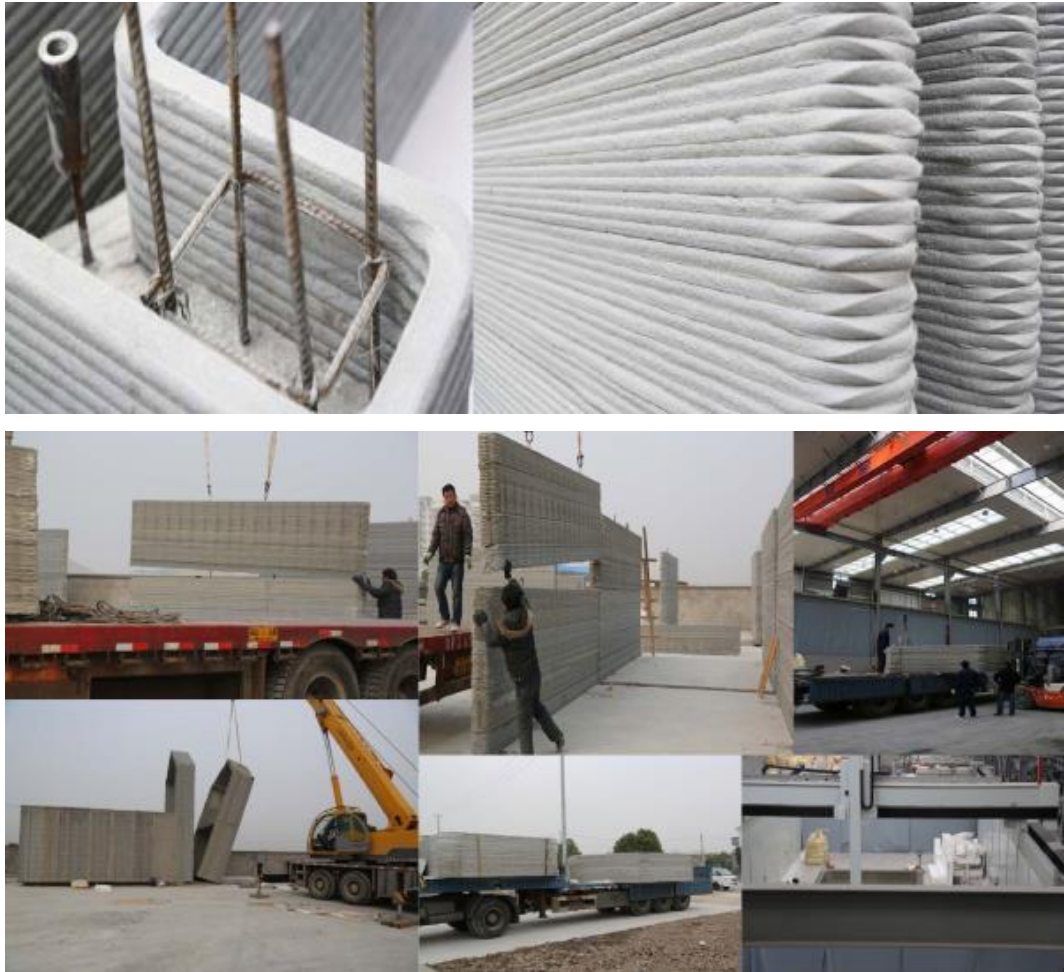


Figura 4.28 – Sistema construtivo dos edifícios da empresa WinSun. Pormenor dos elementos em betão, onde é visível o reforço estrutural em malha de aço, em que o componente produzido por FA funciona como cofragem perdida (em cima); Processo de fabricação e montagem em obra (em baixo).

O material depositado, desenvolvido pela WinSun, é uma mistura de betão, fibra de vidro, areia e um aglutinante para secar mais rápido (Wu et al. 2016). A empresa afirma que o material utilizado para produzir o betão é reciclado de outras construções, resultando num grande potencial de sustentabilidade, na medida em que a utilização desta tecnologia pode reduzir a extração de agregados naturais, o que, no caso de um país tão grande como a China, pode ter um impacto ambiental significativo (Fischer 2016). Com este método de pré-fabricação industrial, a WinSun pretende reduzir os resíduos em obra, tornar o local de obra mais segura, reduzir a quantidade de material necessário numa construção e a mão-de-obra, mas, acima de tudo, tornar o local de obra mais eficiente (Kira 2015).

Dus Architects

Canal House, Urban Cabin, Holanda

Ao contrário do exemplo da WinSun, onde a questão da produção é a base da implementação da tecnologia, encontramos um gabinete de Arquitetura que procura, na Fabricação Aditiva, uma forma experimental de poder materializar os seus conceitos. O gabinete DUS Architects, sediado em Amesterdão, na Holanda, implementa nos seus projetos a componente de tecnologia e inovação, ao mesmo tempo que tenta integrar uma preocupação comunitária. Com recurso à inovação tecnológica, este gabinete explorou novas formas de desenho da Arquitetura, procurando soluções mais sustentáveis. Entre as suas obras, é possível encontrar a tecnologia de FA como instrumento base para a materialização das suas intenções de projeto.

Para construir os seus projetos, o gabinete DUS desenvolveu a sua própria máquina de FA, com a colaboração da Ultimaker, à qual chamaram de *Kamermaker - fabricante de quartos* (tradução literal do Holandês) [Figura 4.29]. Esta máquina de fabricação tem a capacidade de produzir componentes com uma dimensão de 1,6 x 1,6 x 4,5, podendo, inclusivamente, produzir as peças no próprio local de obra, como aconteceu em alguns projetos, devido ao seu carácter móvel. O funcionamento da máquina é muito semelhante ao de outros processos de *Material Extrusion*, utilizando materiais à base de termoplásticos. Dadas as restrições de dimensão da máquina de FA, o processo de construção passa por uma abordagem modular. Como tal, é perceptível que o sistema de construção com esta tecnologia resulta de uma espécie de pré-fabricação em série variável, sendo que cada módulo é restringido apenas pela dimensão limite de fabricação, apesar de, em termos geométricos, as limitações serem quase nulas. Cada secção construída pertence a uma parcela das divisões que constituem o edifício, as quais podem ser diferentes entre si, desde que sejam acauteladas as necessidades estruturais. Por outro lado, o material utilizado é pouco comum na área da construção, sobretudo na sua utilização em termos estruturais. Por isso, algumas paredes são preenchidas com eco-betão leve, também desenvolvido pelos DUS, para garantir reforço extra, atuando, simultaneamente, como isolamento térmico e acústico [Figura 4.31]. Os DUS apontam para uma construção mais sustentável, em que os materiais utilizados podem ser reciclados ou com base biológica, nomeadamente o material de cor preta, patente nos seus projetos, que resulta de uma mistura de bio-plástico que contém 75% de óleo vegetal. Defendem, ainda, que os edifícios feitos segundo este método, quando demolidos, dão a possibilidade de reutilizar o material resultante da demolição, podendo ser novamente processado para construir novos edifícios, gerando, assim, um ciclo de reutilização material.



Figura 4.29 – Máquina de extrusão de plástico “Kamermaker”, que pode trabalhar junto ao local de obra.

Esta tecnologia foi utilizada em projetos como o *Europe building* (2015) ou a *Urban Cabin* (2016), e testada na *Canal House*. O ensaio dos arquitetos DUS com a FA começou com o projeto experimental *Canal House* [Figura 4.30] - até à data não construído à escala real - e consiste numa prova teórica com exposição dos resultados através de alguns modelos do conceito. Contudo, este projeto fundou os princípios de atuação dos trabalhos que têm vindo a ser desenvolvidos pelo grupo, quer na ideia de projeto, quer no sistema construtivo. O desenho do edifício é controlado parametricamente, partindo da soma das dependências do edifício, as quais podem ser alteradas para se adaptarem às necessidades dos clientes. Cada compartimento é produzido individualmente, no próprio local de obra. Cada divisão é, por sua vez, constituída por várias secções que são assembladas posteriormente no local, através de um mecanismo de encaixe já desenhado na própria peça. No processo inverso, estes encaixes permitem facilmente desmontar a estrutura, no caso de ter que ser deslocada ou demolida. A componente estrutural já é equacionada nos próprios módulos. O interior das paredes é parcialmente oco, contendo uma grelha que se assemelha a colunas e que podem assumir várias disposições, consoante as necessidades estruturais em determinado ponto [Figura 4.31]. Todos estes elementos também estão desenhados de forma paramétrica, isto é, assim que é feita uma alteração no desenho são automaticamente adaptados, sem necessidade de voltarem a ser calculados. Nas paredes são ainda incorporadas zonas ocas para albergar os sistemas funcionais da casa, como a rede de esgotos ou tubagens de canalização.

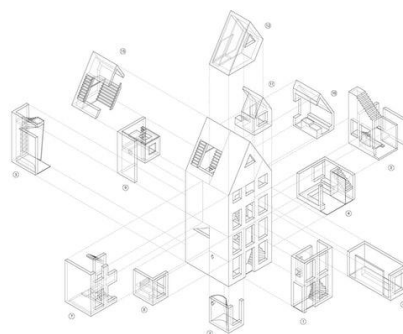


Figura 4.30 – Projeto “Canal House”. Imagem foto-realista da casa (esquerda); Esquema do conjunto de módulos que a constituem (direita).



Figura 4.31 – Pormenor em que é possível ver a gralha no interior das paredes, assim como o reforço de algumas zonas com betão.

Uma vez que o edifício é fabricado integralmente num único processo, o resultado produzido constitui o acabamento final. Por outro lado, a capacidade geométrica do processo permite incorporar na fachada do edifício diversas formas ou padrões tridimensionais, com motivos ornamentais ou funcionais. Nesta casa, os DUS utilizaram esses padrões na fachada para adaptar a construção às condições ambientais, sendo que o desenho paramétrico adapta-os, por exemplo, ao clima ou exposição solar, de forma a criar sombreamento para melhorar o comportamento térmico e energético⁶.

⁶ A informação apresentada sobre o projeto da *Canal House* foi retirada da página dedicada à sua apresentação, disponível em: <http://3dprintcanalhouse.com/>

Mais recentemente, a *Urban Cabin* [Figura 4.32, Figura 4.33] é o projeto construído que, até a data, mais se aproxima de uma eventual aplicação à grande escala da FA com o sistema dos DUS Architects, e que serviu de teste à escala 1:1 da futura construção da *Canal House*. A casa, com 8 metros quadrados, foi "*inteiramente impressa tridimensionalmente com material de cor preta de base biológica que mostra diferentes tipos de ornamentos de fachada, técnicas de otimização formal e soluções inteligentes de isolamento e consumo material*"⁷. A programa do projeto é um abrigo de Verão, com um único quarto e uma cama, sem casa de banho, embora com uma banheira também ela fabricada por FA, um alpendre de entrada e uma única janela. Neste contexto, importa também salientar o pavilhão *Europa* [Figura 4.34], desenvolvido para a presidência da Holanda na União Europeia, para um evento que durou 6 meses. Atendendo ao cariz temporário do projeto, a utilização da FA possibilitou uma construção mais sustentável, quer pela utilização de plástico de origem vegetal, quer pela facilidade de montagem, desmontagem e posterior reutilização ⁷.

Este método de construção revela potenciais vantagens, sobretudo a demonstração da capacidade de produzir um edifício completo utilizando, essencialmente, um único processo, uma única tecnologia e um único material.



Figura 4.32 – Projeto “Urban Cabin”.

⁷ A citação, assim como a restante informação dos projetos, pode ser acedida na página online de apresentação dos Dus Architects, disponível em: <http://houseofdus.com/>



Figura 4.33 – Projeto “Urban Cabin”.

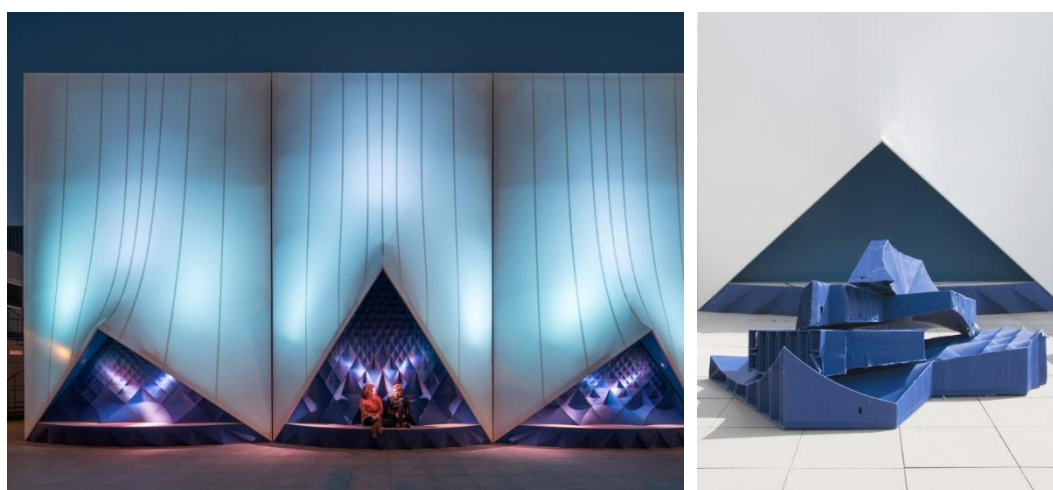


Figura 4.34 – Pavilhão “Europa”. Em azul os componentes produzidos por FA, e a facilidade de desmontagem e reutilização material características deste método (direita).

Oportunidades

Segundo os projetos apresentados, é então possível identificar um conjunto de oportunidades que a FA pode introduzir na construção de edifícios, entre as quais se destacam:

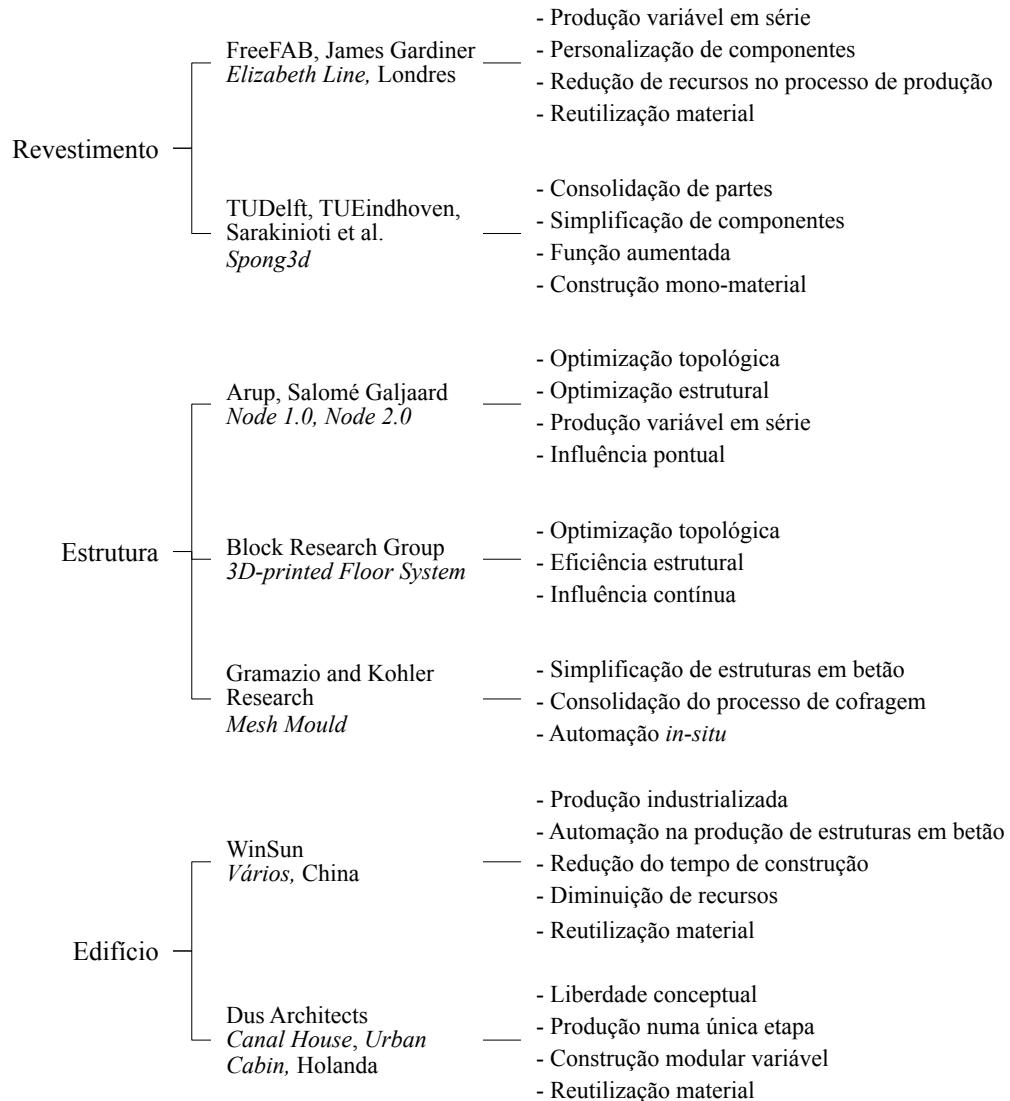


Figura 4.35 - Organograma das oportunidades da FA na construção de edifícios.

4.3. Materialidade

O desenho da Arquitetura caminha no sentido de encontrar soluções cada vez mais viáveis para atingir uma total liberdade criativa, em que a versatilidade da produção personalizada e variável supera a rigidez da produção em série. A personalização poderá, inclusivamente, chegar até aos materiais e à sua aplicação. Com a Fabricação Aditiva, esta interpretação poderá abrir o caminho à introdução de materiais pouco comuns na construção, assim como à exploração de novas materialidades. Este facto é designado por *Digital Materiality* (Gramazio e Kohler 2008), que descreve a possibilidade de os materiais poderem ser projetados e transformados com a assistência da informação digital, como meio de potenciar as suas características. Para o demonstrar, foram selecionadas três abordagens distintas: a reutilização, em que materiais locais e reciclados foram aplicados na Arquitetura, explorando, desta forma, materiais que normalmente não seriam aplicados na construção, conforme demonstrado no trabalho do grupo de investigação Emerging Objects; a variação das propriedades materiais, cujo conceito não é novo, mas que a FA poderá ter um papel facilitador na sua aplicação em Arquitetura, como demonstra o projeto *Variable Density Concrete*; e a resolução, um termo normalmente associado ao *pixel* (a unidade mínima da imagem digital), mas que está também a ser utilizado para descrever o grau de definição do acabamento em objetos produzidos por FA, como no projeto *Digital Grotesque*.

Emerging Objects

Vários

Do ponto de vista ambiental, grande parte da pegada ecológica de uma edificação provém de todos os processos associados à transformação material, e concretamente à extração, processamento, logística e manuseamento. Urge, então, a necessidade de encontrar soluções sustentáveis, baratas e recicláveis, que utilizem materiais disponíveis localmente. Neste contexto, a Fabricação Aditiva parece ser uma das tecnologias mais capazes de explorar as possibilidades da manipulação personalizada dos materiais, como a sua aplicação sustentável na Arquitetura. Estas são algumas das questões investigadas pelo projeto Emerging Objects, situado na Califórnia, nos Estados Unidos da América, e liderada pelo professor de Arquitetura Ronald Rael, da University of California Berkeley, e por Virginia San Fratello, professora de Design em San José State University. Estes professores tentam explorar a tecnologia material, não de uma forma

puramente científica, mas segundo uma perspetiva tradicional, readaptando materiais tradicionais à luz do séc. XXI (Gramazio et al. 2014). Criam objetos e componentes que possam vir a constituir soluções para a Arquitetura, utilizando materiais pouco comuns na construção ou outros habitualmente utilizados, todavia processados de uma forma totalmente própria. Neste processo são usados vários tipos de tecnologias de FA, como *SLS*, *FDM*, *3DP*, *LOM*, etc., que, através de alterações ao funcionamento das máquinas, conseguem criar objetos com materialidades únicas. Com recurso a estas máquinas, conseguiram fabricar componentes com materiais provenientes de diversos meios, entre os quais materiais tradicionais colhidos localmente, materiais provenientes de processos de reciclagem ou de remanescentes de produção industrial (Rael 2017).



Figura 4.36 – Processo tradicional de salmoura, que inspirou o projeto “Saltygloo”.

O exemplo mais elucidativo da exploração de materiais vernaculares é o projeto *Slatygloo*, datado de 2013 [Figura 4.37]. “Na paisagem de San Francisco Bay a energia natural do sol e do vento produz 500.000 toneladas de sal por ano”, que é recolhido nas tradicionais salinas de Redwood City, com mais de 100 anos. A partir da colheita dessa matéria-prima produzida pelo meio natural, foi construída uma estrutura em forma de iglô, construído com 336 painéis diferentes. Cada peça foi produzida por uma máquina de FA adaptada para trabalhar com sal, ao estilo de *Binder Jetting*. As características naturais do sal permitem dar à estrutura uma qualidade translúcida, ao mesmo tempo que se torna uma solução económica, leve e impermeável.

Este projeto é prova da possibilidade de utilizar os recursos naturais localmente disponíveis, através transformação dos materiais e da construção no próprio local, evitando o transporte globalizado de materiais industriais para onde tradicionalmente não pertencem (Rael e San Fratello 2011). Foram também explorados outros materiais que podem ser encontrados naturalmente em determinadas regiões, como a areia e a argila, experimentando a sua aplicação em revestimentos exteriores [Figura 4.38], como tijolos com função de arrefecimento [Figura 4.38], sistema de blocos resistente a terremotos, tijolos para revestimento exterior, etc..



Figura 4.37 - Projeto "Saltygloo".

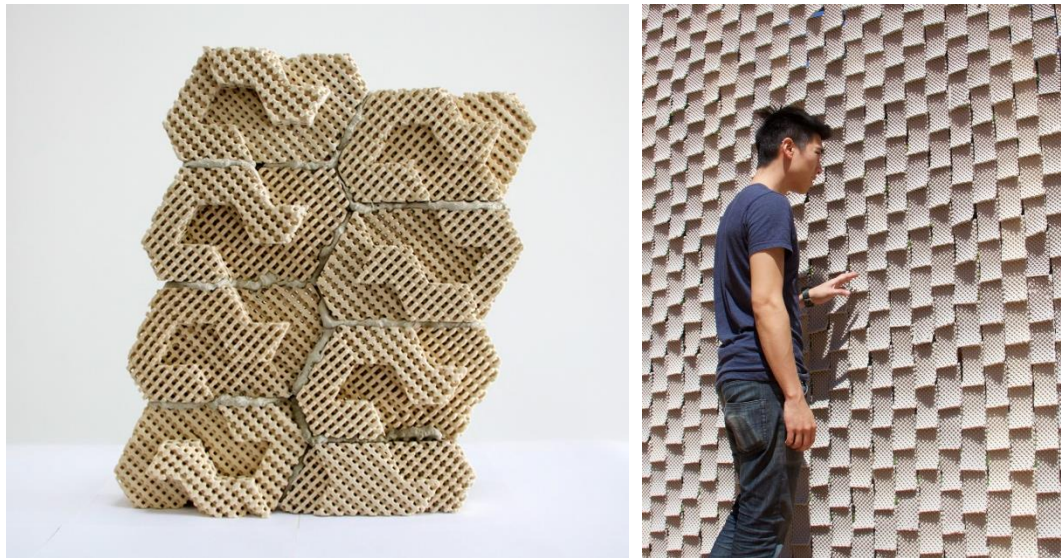


Figura 4.38 – Projetos produzidos com argila. “Cool Brick” 2015, um tijolo com função de arrefecimento (esquerda); “Seed Stitch” 2016, elementos de revestimento (direita).

A utilização de materiais recicláveis é outra das formas de sustentabilidade à qual FA pode dar uma resposta. Desta feita, os Emerging Objects, tomando o exemplo da borracha, um material maioritariamente utilizado em pneus automóveis e um dos que representa maior desperdício no mundo, com a agravante de não ser biodegradável, encontraram uma forma de reinventar a borracha reutilizada de pneus de automóveis com recurso à FA, comprove se prova no projeto *Rubber Pouff* [Figura 4.39]. Esta experiência permitiu concluir que este pode ser um material com características interessantes e com muitas aplicações possíveis em Arquitetura, tais como mobiliário público, painéis exteriores ou painéis acústicos. À semelhança da borracha, o papel foi outro material que conseguiram reciclar para utilização com FA.



Figura 4.39 – Projeto “Rubber Pouff” 2016. Depósito de pneus (esquerda); Objeto produzido (direita).

A FA também pode tirar partido dos materiais utilizados na produção industrial, quer por reciclagem, quer pela utilização de material desperdiçado ao longo dos processos. Foram explorados materiais, como a madeira, desperdícios de produtos agrícolas [Figura 4.40] ou outros menos comuns, por exemplo, ingredientes alimentares, entre os quais café, chá ou cascas de uva utilizadas na vindima. Esta ideia de utilizar matéria-prima já recorrente na produção, sobretudo matéria-prima que pode ser cultivada, abre caminho à utilização de um novo conjunto de materiais naturais.



Figura 4.40 – Projeto “Poroso”, produzido com desperdícios agrícolas.

O cimento foi também um material explorado pelos Emerging Objects, mas, neste caso, pesquisando novas materialidades de um dos materiais mais comuns na construção. Com o recurso a FA foi possível adquirir não só maiores capacidades geométricas, mas também características dificilmente conseguidas de outra forma, como o projeto *Drum*, em que foi produzido um objeto composto por painéis bastante finos e, consequentemente, mais leves, ou o pavilhão *Bloom*, que cria um padrão de figurativo translúcido, através das pequenas aberturas nos 840 tijolos customizados [Figura 4.41].



Figura 4.41 – Pavilhão “Bloom”, 2015.

Com base na exemplificação de muitos dos trabalhos e conquistas tecnológicas por si alcançadas, os Emerging Object construíram, em 2017, o projeto protótipo de uma casa. A *The Cabin of 3D Printed Curiosities* [Figura 4.42] combina muitos dos materiais, *software* e *hardware* experimentados nos projetos descritos anteriormente, demonstrando, assim, o potencial da aplicação da FA na Arquitetura. A casa foi revestida, no interior, com elementos feitos em FA, concretamente materiais translúcidos de origem sintética que iluminam o interior da cabana, contrastando com os materiais naturais no seu exterior⁸.

⁸ A informação dos projetos mencionados dos Emerging Objects, foi retirada pode da página de divulgação do grupo, disponível em: <http://www.emergingobjects.com/>

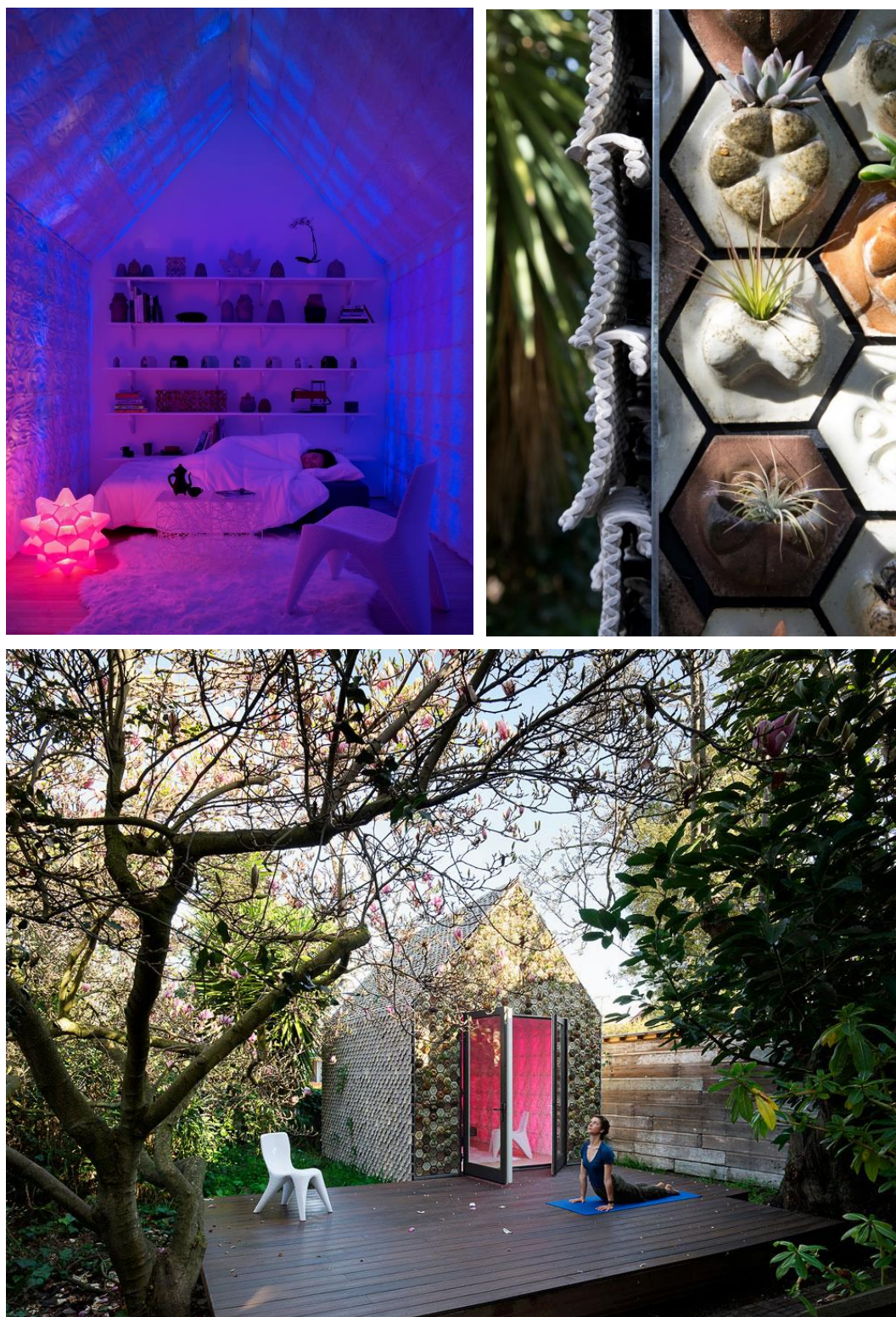


Figura 4.42 – “The Cabin of 3D Printed Curiosities”, 2017. Vista interior (em cima, esquerda); Pormenor exterior dos componentes produzidos por FA (em cima, direita); Vista exterior (em baixo).

The Mediated Matter

Variable Density Concrete

Até então a FA tem produzido, na sua grande maioria, objetos como um processo de assemblagem de matéria, em que os materiais têm características homogêneas. No entanto, o grupo de investigação The Mediated Matter, liderado pela arquiteta Neri Oxman, utiliza a FA para estudar a produção de objetos com variação nas suas propriedades materiais. *Materiais com Gradação Funcional* é um tipo de fenómeno recorrente no meio natural e biológico, que ocorre, por exemplo, na gradação num tronco de uma palmeira, em que lhe é conferida a capacidade de dobrar sem, no entanto, perder a rigidez, ou no osso trabecular, em que a sua estrutura de densidade variável corresponde à distribuição dinâmica das forças [Figura 4.43] (Oxman et al. 2011). Desta forma, os avanços tecnológicos, digitais e de fabricação inspirados na natureza poderão vir a permitir o controlo gradual das propriedades materiais, a fim de produzir componentes funcionais para aplicação à escala da Arquitetura (Oxman 2010).

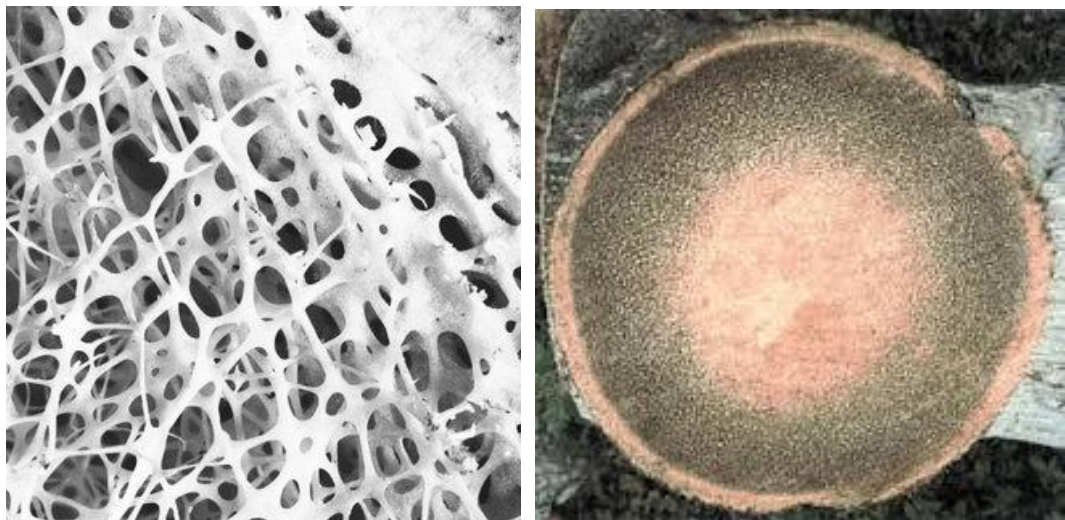


Figura 4.43 – Estrutura celular gradiente do osso trabecular (esquerda) e do tronco de uma palmeira (direita).

O protótipo *Variable Density Concrete* foi um teste à variação da densidade de um componente em betão, que permitiu comprovar que a gradação material pode reduzir a massa, assim como o desperdício material, ao mesmo tempo que é aumentada a sua capacidade estrutural (Oxman et al. 2014). Com base no pelo exemplo da variabilidade de densidade do osso e da palmeira, os componentes em betão foram testados de duas maneiras: por meio de uma variação radial em que o exterior da peça tem maior densidade que o interior; e através de uma variação gradual longitudinal. A porosidade foi alcançada através da produção de uma espuma de betão que controlava a quantidade de bolhas de gás de hidrogénio criadas pela reação da mistura de alumínio em pó e cal [Figura 4.44] (Oxman et al. 2011). Os testes efetuados a estes protótipos demonstraram que uma viga com gradação pode ter entre 9% a 13% menos massa e suportar a mesma carga que uma viga idêntica produzida segundo os métodos convencionais (Oxman et al. 2011). Deste modo, o The Mediated Matter está a investigar a produção de uma ferramenta capaz de misturar e controlar dinamicamente a deposição de estruturas gradientes contínuas.

O potencial para produzir componentes à escala da Arquitetura está em aumentar o seu desempenho com a variação das propriedades (densidade, elasticidade, translúcidas) ou integração de funções (ventilação, capacidade estrutural) (Oxman et al. 2011). “*Em contraste com materiais naturais e tecidos biológicos, construções fabricadas industrialmente, como pilares, são tipicamente volumetricamente homogêneos. Enquanto o uso e aplicação de materiais homogêneos permitem a facilidade de produção, muitas qualidades - como melhorias estruturais, peso, utilização material, e funcionalidade - podem ser obtidos pelo desenvolvimento e aplicação de materiais com função gradual [...] [em componentes] à escala da Arquitetura*” (Oxman et al. 2011: 1).

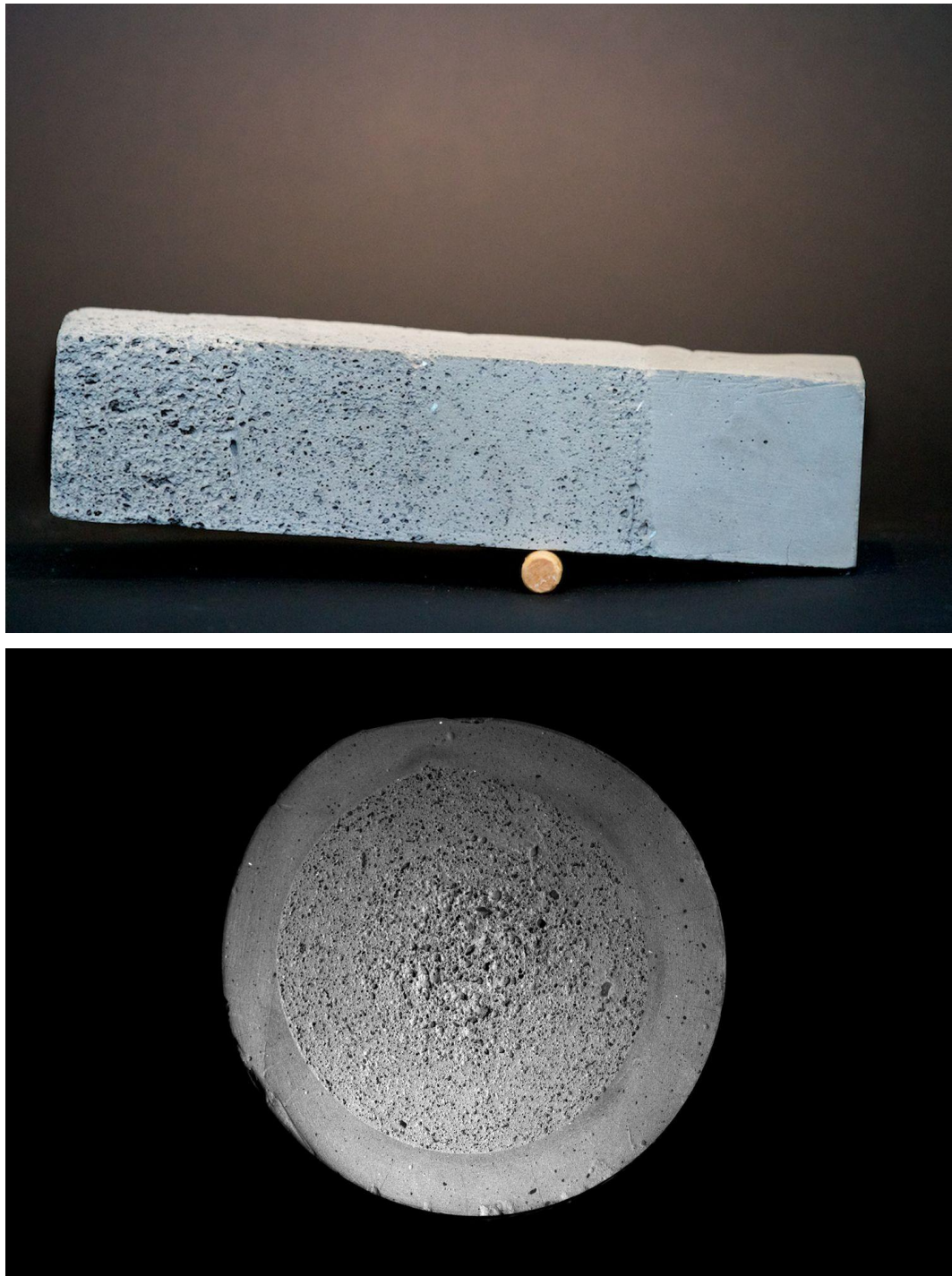


Figura 4.44 – Betão gradiente, com variação longitudinal (em cima) e radial (em baixo).

Michael Hansmeyer e Benjamin Dillenburger

Digital Grotesque

Demonstrada a grande diversidade de possíveis materiais, assim com a possibilidade da variação das propriedades, o projeto que se segue demonstrará que, pelo facto da FA construir diretamente com os materiais em vez da montagem de componentes, é possível alcançar uma nova escala de desenho. O projeto *Digital Grotesque* tentou demonstrar um nível de detalhe aplicável à Arquitetura nunca antes alcançado, só possível graças à maturação de duas tecnologias: o desenho computacional e a FA. Este projeto levou o desenho e a materialização até uma escala milimétrica. Foi desenvolvido na Swiss Federal Institute of Technology (ETH), em Zurich, liderado pelos arquitetos Michael Hansmeyer e Benjamin Dillenburger (Hansmeyer e Dillenburger 2013).

Até à data, o desenho CAD foi essencialmente utilizado para criar projetos e volumes de superfícies simples, alcançáveis pelos meios de produção correntes. Contudo, neste projeto, o objetivo foi exatamente o oposto, isto é, o de construir apenas o que o desenho conseguisse alcançar. O intuito era materializar um desenho de tal complexidade que “*a máxima articulação da superfície cria profundidade volumétrica, onde a luz é refletida em direções diferentes e os limites da Arquitetura tornaram-se espacialmente difusos*”⁹. Assim, quanto maior a proximidade, maior a informação revelada, tal como aconteceu na Arquitetura Clássica, em que o conjunto do pormenor excedia a capacidade de perceção humana.

Os autores optaram por uma técnica de FA do tipo *Binder Jetting*, disponibilizada pela empresa Voxeljet, que é utilizado sobretudo na indústria metalúrgica para a produção de moldes. Esta tecnologia utiliza areia (arenito) e constrói estruturas autoportantes, com uma precisão de até 0,13 milímetros e uma velocidade de 3 cm por hora (numa área de 4 x 2 metros) (Hansmeyer e Dillenburger 2013).

⁹ Citação retirada da página na internet dedicada ao projeto Digital Grotesque, disponível em: <https://digital-grotesque.com/design/>



Figura 4.45 – Parede da instalação “Grotto I”, 2013.

A primeira instalação, o *Groto I* em 2013 [Figura 4.45], consiste em dois volumes cúbicos de faces lisas, construídos à escala humana, em que entre os surge uma câmara de 16 metros quadrados, num jogo de geometrias complexas inspiradas em estilos clássicos. Uma dicotomia entre o caos e a ordem. O desenho deste espaço foi criado com recurso a algoritmos desenvolvidos propositadamente para o projeto. Este processo de desenho cria uma cadeia fractal, onde uma superfície é dividida sequencialmente até atingir texturas milimétricas. Ao alterar o rácio da divisão, é possível controlar a geometria, assim como produzir uma quantidade quase infinita de formas diferentes. O resultado foi uma *mesh* com 260 milhões de faces individuais e detalhes com menos de 2 milímetros que, quando convertida em secções transversais (ficheiro .stl) para ser fabricada, gerou 30 biliões de *voxels* (Hansmeyer e Dillenburger 2014). O projeto inteiro poderia ter sido produzido em seis partes. Contudo, mais do que o problema da dimensão permitida inerente às tecnologias FA, foram a logística, o transporte e a montagem que, neste caso, criou mais restrições. Nessa circunstância, optaram, então, pela construção em peças que fossem possíveis de transportar num empilhador (1,20 x 1,20 metros) e de serem carregadas por quatro pessoas [Figura 4.46]. Para este efeito, o peso foi também menorizado, optando por peças parcialmente ocas, com suportes internos estruturais. Na pós-produção, a peça levou ainda um revestimento final em resina e uma pintura, de modo a tornar as superfícies mais homogéneas (Hansmeyer e Dillenburger 2013).



Figura 4.46 – Componentes produzidos por FA que compõem a instalação “Groto II”.

Para além desta primeira instalação, *Groto I*, que está em exposição no Frac Centre, em Orleans, na França, os arquitetos Michael Hansmeyer e Benjamin Dillenburger desenvolveram, recentemente, uma segunda, *O Groto II*, 2017 [Figura 4.47], realizada para a exposição *Imprimer le monde* no Centre Pompidou, em Paris, que é como uma evolução da primeira, embora, nesta última, tivessem procurado aumentar a complexidade e a precisão da fabricação. Para além destes, foram produzidos outros dois projetos similares - as *Subdivided Columns*, em 2011, para a exposição *Six Order* na Gwangju Design Biennale da Coreia do Sul, e a parede *Arabesque Wall*, em 2015¹⁰.

Com este método de fabricação, a geometria é construída de uma forma automática, sem perda de informação. “*A escala de uma possível articulação tridimensional e tectónica pode ser trazido para a escala dos milímetros. Esta tecnologia promete uma maior liberdade de composição e fabricação assim como uma racionalização da fabricação de Arquiteturas não-standard*” (Hansmeyer e Dillenburger 2014: 97). Consequentemente, e do ponto de vista de quem produz, a complexidade da expressão formal deixou de ter custos condicionantes, ao passo que, para quem desenha, constitui uma total liberdade. Neste projeto, a complexidade da geometria contrasta com a simplicidade dos processos que o geram. De tal forma que a total liberdade resultou num grande exagero formal, um vislumbre do que poderá vir a ser materialidade da Arquitetura no futuro. Materialidade essa, que pode deixar de ser composta não só pela conjugação de módulos, como tijolos, painéis pedras, mas também pela composição do próprio material que é transformado diretamente para a sua forma global. “*Numa palestra aos estudantes em 1971, Louis Kahn afirmou: Vocês perguntam ao tijolo: “o que queres, tijolo?” E o tijolo diz, “eu gostava de um arco.” E se vocês responderem, “os arcos são caros, e eu posso usar um lintel em betão sobre um vão. O que achas disso tijolo?” O tijolo responde, “eu gostava de um arco” [...]. Hoje a pergunta seria: o que é que um grão de areia gostaria de ser?*” (Dillenburger e Hansmeyer 2013: 354).

¹⁰ Mais informação, sobre os projetos, pode ser consultada na página de Michael Hansmeyer, disponível em: <http://www.michael-hansmeyer.com/index.html>

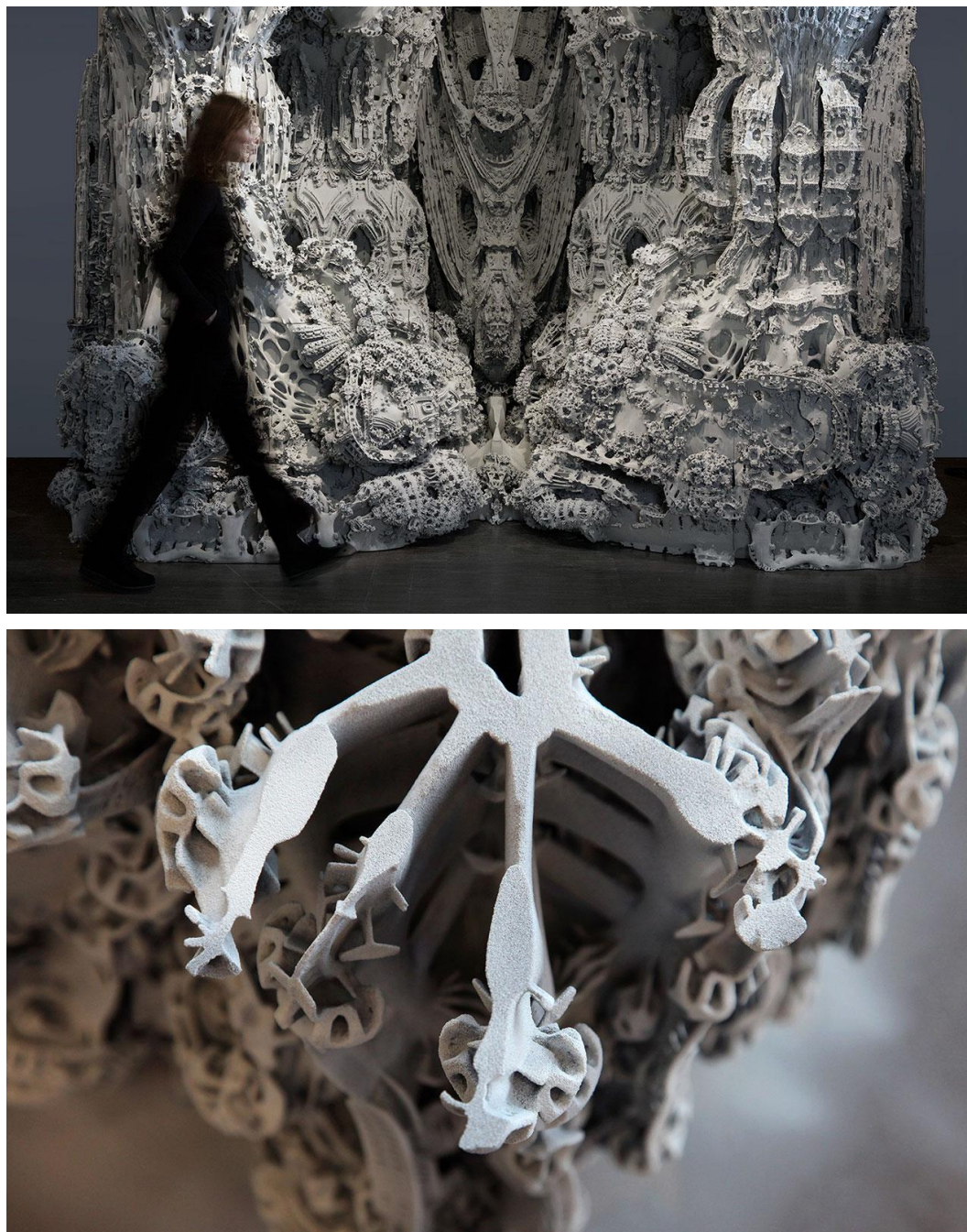


Figura 4.47 – Instalação “Grotto II”.

Oportunidades

De acordo com os projetos aqui abordados, é possível verificar algumas oportunidades na materialidade da Arquitetura derivadas da intervenção da FA, realçando-se as seguintes:

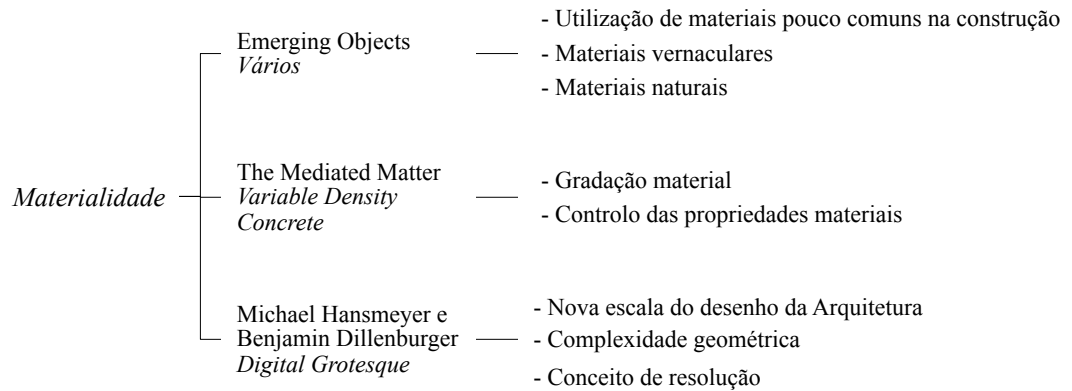


Figura 4.48 - Organograma das oportunidades da FA na materialidade da Arquitetura.

4.6. Experiência pessoal

Motivado pelo tema desta dissertação e, consequentemente, pelo interesse em averiguar as oportunidades emergentes da sua aplicação em Arquitetura, investigadas no decorrer do estudo que serviu de base à elaboração deste trabalho, foi também intencional o contacto prático com esta tecnologia. Esta oportunidade surgiu no decorrer da minha colaboração, enquanto aluno, no grupo de investigação Digital Fabrication Laboratory do CEAU, liderado pelo Professor José Pedro Sousa, orientador desta dissertação. Entre outras experiências de colaboração, tirei partido das instalações e da tecnologia disponível neste centro de estudos que, para além da investigação do impacto da Fabricação Aditiva em termos teóricos, me permitiu também criar a minha própria investigação pessoal na pesquisa e aplicação prática destas tecnologias. O DFL tem, atualmente, nas suas instalações, duas máquinas de FA do tipo *Material Extrusion*. Com estas máquinas já foi realizado um vasto conjunto de projetos e protótipos. Além destas, também já foram exploradas outras tecnologias de FA, como a *SLS*, utilizada na maquete da *Serpentine Gallery* de Álvaro Siza Vieira [Figura 4.49]. Nesta primeira fase, através do contacto com os modelos que fazem parte da galeria expositiva dos trabalhos do DFL, tive a oportunidade de compreender as características possíveis de aplicar ao desenho e à fabricação de objetos por este meio, tal como desenvolvido no capítulo 2. Por outro lado, ao integrar este grupo de investigação tive a oportunidade de aprender a utilizar estas tecnologias, assim como envolver-me em todo o processo de produção de objetos por estes métodos, desde o desenho tridimensional e preparação dos modelos digitais para fabricação, até ao funcionamento e calibração da máquina. A partir destes conhecimentos adquiridos, colaborei em alguns projetos experimentais de materialização de modelos físicos, destacando-se o modelo parcial de um edifício em construção, desenvolvido no âmbito de um projeto piloto de integração de novas tecnologias e comunicação em obra, levado a cabo pela empresa de construção Casais. Como experiência prática, será aprofundado o meu envolvimento no projeto, à escala real, do *Tri-Arch*.

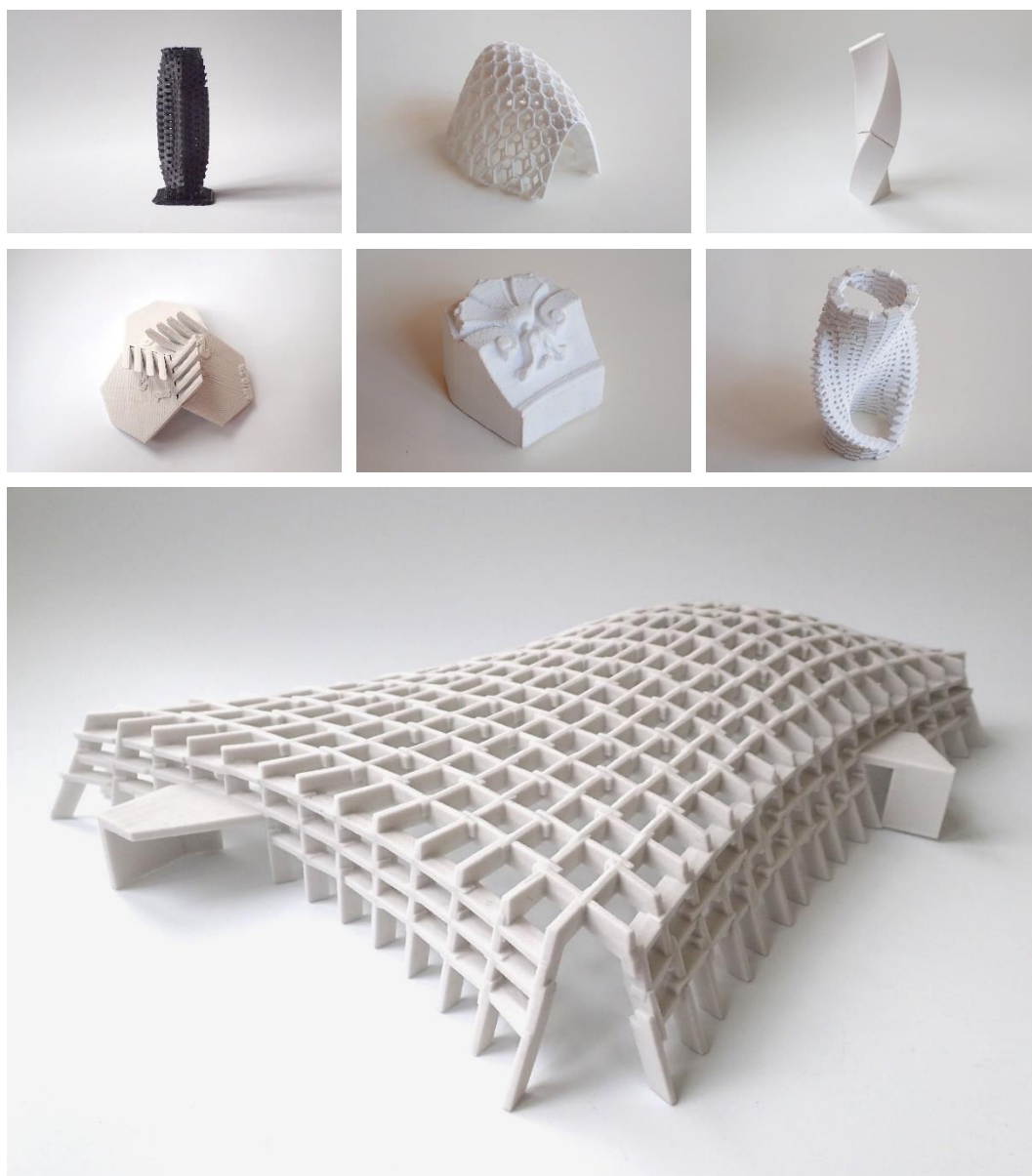


Figura 4.49 – Exemplos de maquetes produzidas por FA no DFL. Maquete da Serpentine Gallery de Álvaro Siza Vieira (em baixo).

Digital Fabrication Laboratory

Tri-Arch

A estrutura *Tri-Arch* (2017), para além do meu envolvimento pessoal, contou com a colaboração de outros elementos do DFL, entre os quais o Professor José Pedro Sousa e os investigadores Pedro de Azambuja Varela e Rafael Santos. Este é a continuação da investigação iniciada com o projeto *Trefoil* (2013-14), um projeto à escala do modelo, baseado numa superfície em nó de trevo, com uma estrutura em treliça irregular contínua [Figura 4.50]. Os dois projetos, à semelhança das juntas da Arup analisadas anteriormente, visam a construção de estruturas complexas, através da produção variável em massa e que, ao contrário de outras aplicações de FA, é utilizada para a construção total de uma estrutura ou objeto. Na Arquitetura, este método pode ser utilizado para influenciar um grande conjunto, através da fabricação de componentes singulares de dimensões reduzidas. Contudo, ao contrário do *Trefoil*, o *Tri-Arch* aplica esta abordagem a uma estrutura à escala 1:1, utilizando materiais reais de construção e com uma preocupação estrutural.

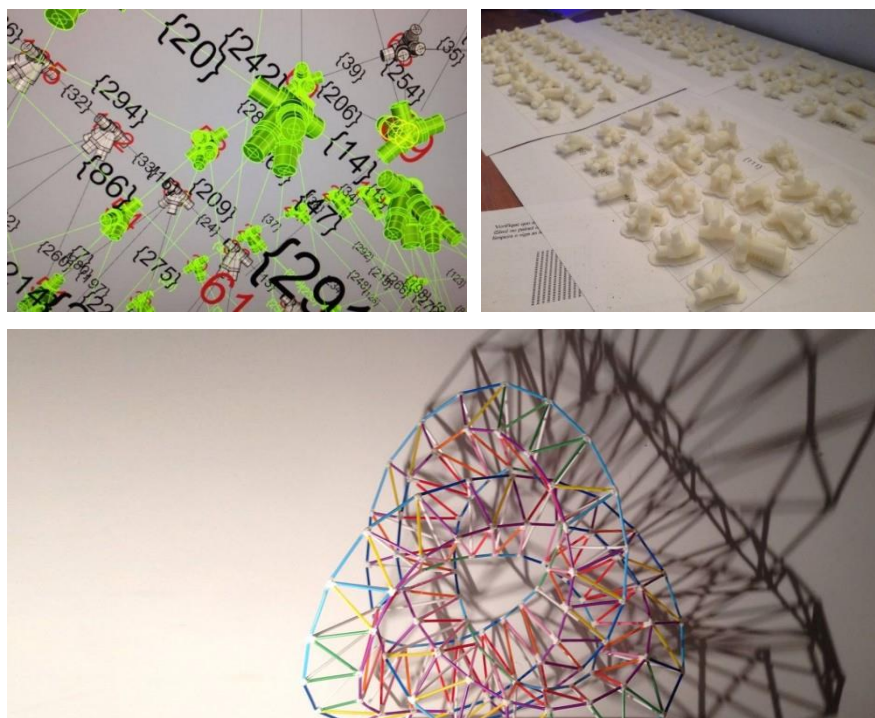


Figura 4.50 – Projeto “Trifoil”. Modelação digital dos componentes (em cima, esquerda); Disposição das juntas fabricadas (em cima, direita); Objeto final (em baixo).

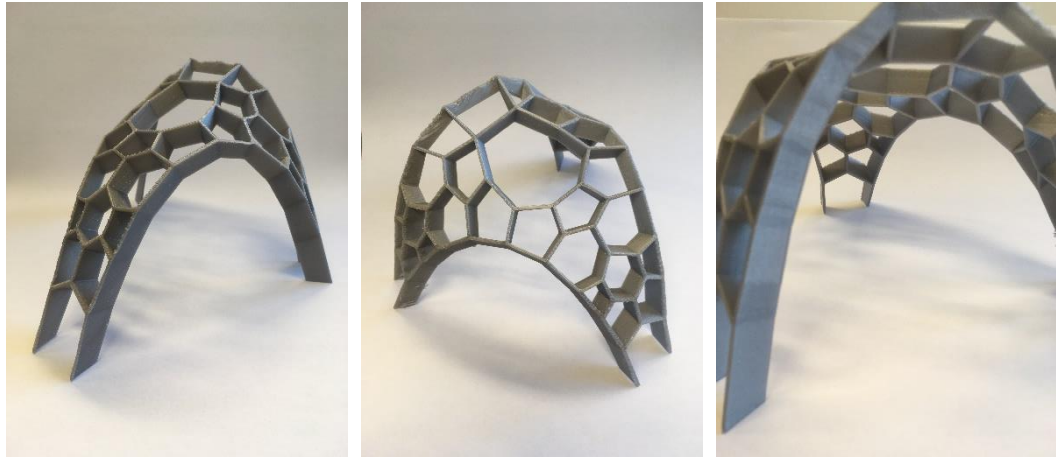


Figura 4.51 – Maquete do projeto “Tri-Arch”, produzida por FA. O processo de fabricação da maquete pode ser visitado no capítulo 2.1.

Geometricamente, o *Tri-Arch* é um arco de três pernas, composto por uma estrutura alveolar de diferentes ângulos, constituída por 106 diferentes placas de ferro com 1 mm, cortado por CNC. Estas placas são unidas e direcionadas por 144 juntas em forma Y, também elas diferentes entre si, produzidas por tecnologia de FA *desktop* do tipo *Extrusion Deposition*, em ABS. Com o objetivo de obter uma otimização material e estrutural, reduzindo o tempo de fabricação das juntas, estas variam na sua espessura, sendo que na base são mais grossas e, à medida que vão sendo dispostas em altura, essa espessura diminui. Para desenhar o arco foi utilizado o *plugin* Kangaroo do Grasshopper no Rhinoceros, para obter a forma estrutural da volumetria, enquanto que para gerir a grande quantidade de informação derivada da variação das juntas e das placas foi utilizado o desenho paramétrico, através da ferramenta digital Grasshopper [Figura 4.52]. O *Tri-Arch* foi desenvolvido especificamente para ser uma amostra da participação do DFL na feira de construção *CONCRETA 2017*, no Porto. Atendendo à característica da FA de poder fabricar objetos numa única etapa e com apenas uma ferramenta, a intenção de fabricação do projeto passava por dispor dessa versatilidade de produção para abrir todo o processo de construção aos visitantes. Enquanto que, no primeiro dia, era possível ver algumas das as peças a serem produzidas na máquina, no segundo dia os visitantes puderam ver os colaboradores do DFL a montar a estrutura, sendo possível, nos dois dias seguintes, comprovar a utilização de peças produzidas por FA na construção de uma estrutura complexa [Figura 4.53].

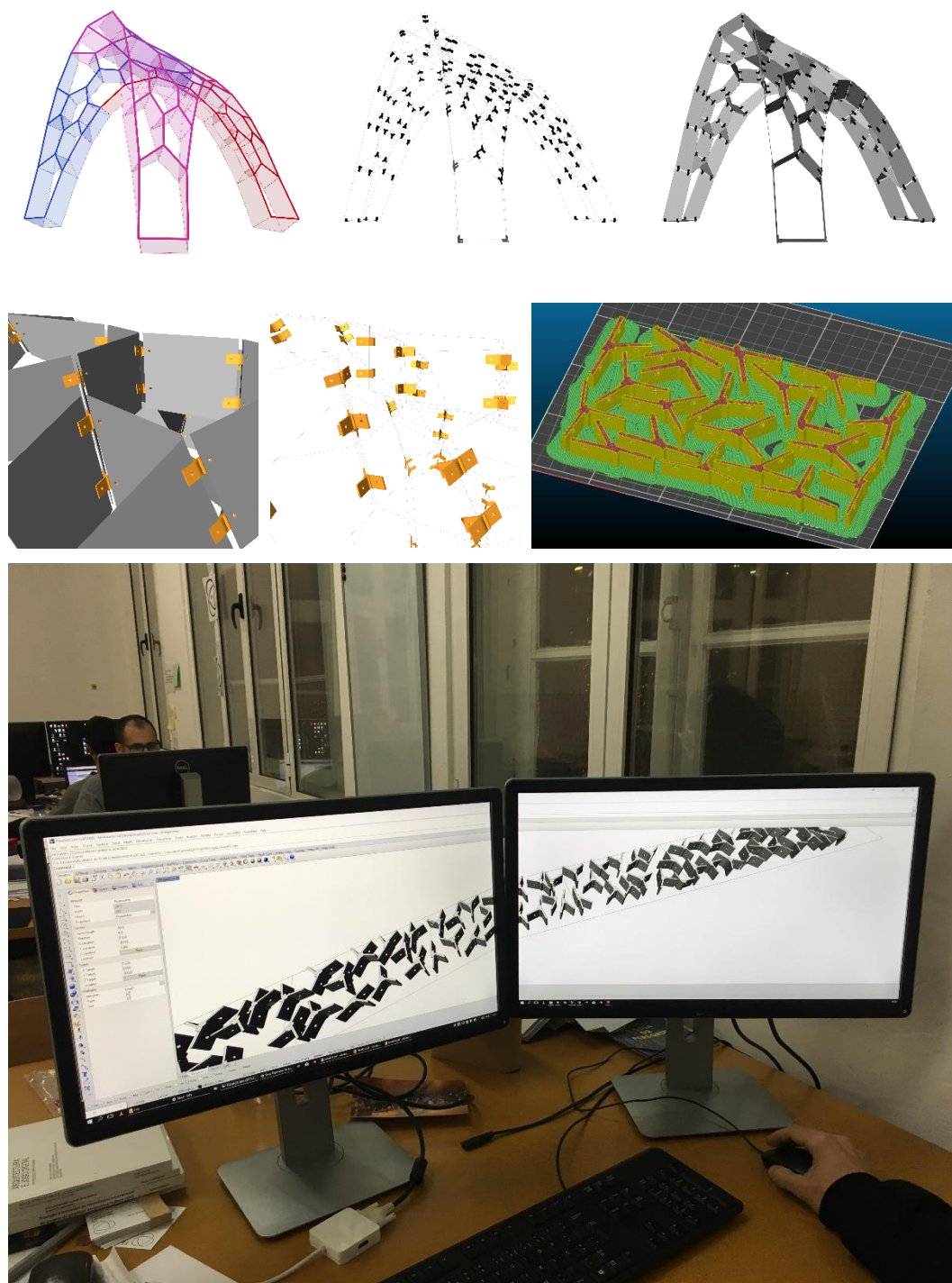


Figura 4.52 – Processo digital das juntas. Modelação da estrutura (primeira linha); Preparação do ficheiro de fabricação das juntas (segunda linha); Ambiente de trabalho no DFL (em baixo).



Figura 4.53 – Fabricação e montagem do “Tri-Arch”. Ambiente de trabalho no decorrer da CON-CRETA 2017 (em cima); Fabricação das juntas (segunda linha); montagem da estrutura (terceira linha).

O objetivo foi cumprido na demonstração da capacidade de desenho computacional e de fabricação por meios digitais, e concretamente da utilização da FA, sem a qual não seria possível materializar uma estrutura com este grau de complexidade, tanto no tempo, como nos meios ou, até mesmo, nos custos inerentes à sua produção. Este método revelou-se bastante eficiente para a produção em massa de peças variáveis, dado que foi possível produzir apenas com uma máquina, sem necessidade de intermediários (fábricas ou empresas especializadas). Ainda assim, para futuros trabalhos, deverá ser investigada uma melhor otimização das juntas, quer no desenho, quer na utilização material, a fim de se alcançar melhores resultados estruturais. Outras pretensões futuras é o prosseguimento desta investigação com materiais mais resistentes, através da produção de componentes em metal, quer por fabricação direta ou por fabricação de moldes para fundição. Neste âmbito, esta investigação já deu origem a duas publicações: a primeira no IJUP: *Additive Fabrication in Architecture. The “TriArch” project* (Carvalho e Sousa 2018); e a segunda no eCAADe: *Mass-customization of joints for Non-Standard Structures through Additive Manufacturing. The Trefoil and the TriArch projects* (Sousa et al. 2018).



Figura 4.54 – Projeto “Tri-Arch” no contexto da feira CONCRETA 2017.



Figura 4.55 - Projeto “Tri-Arch”.

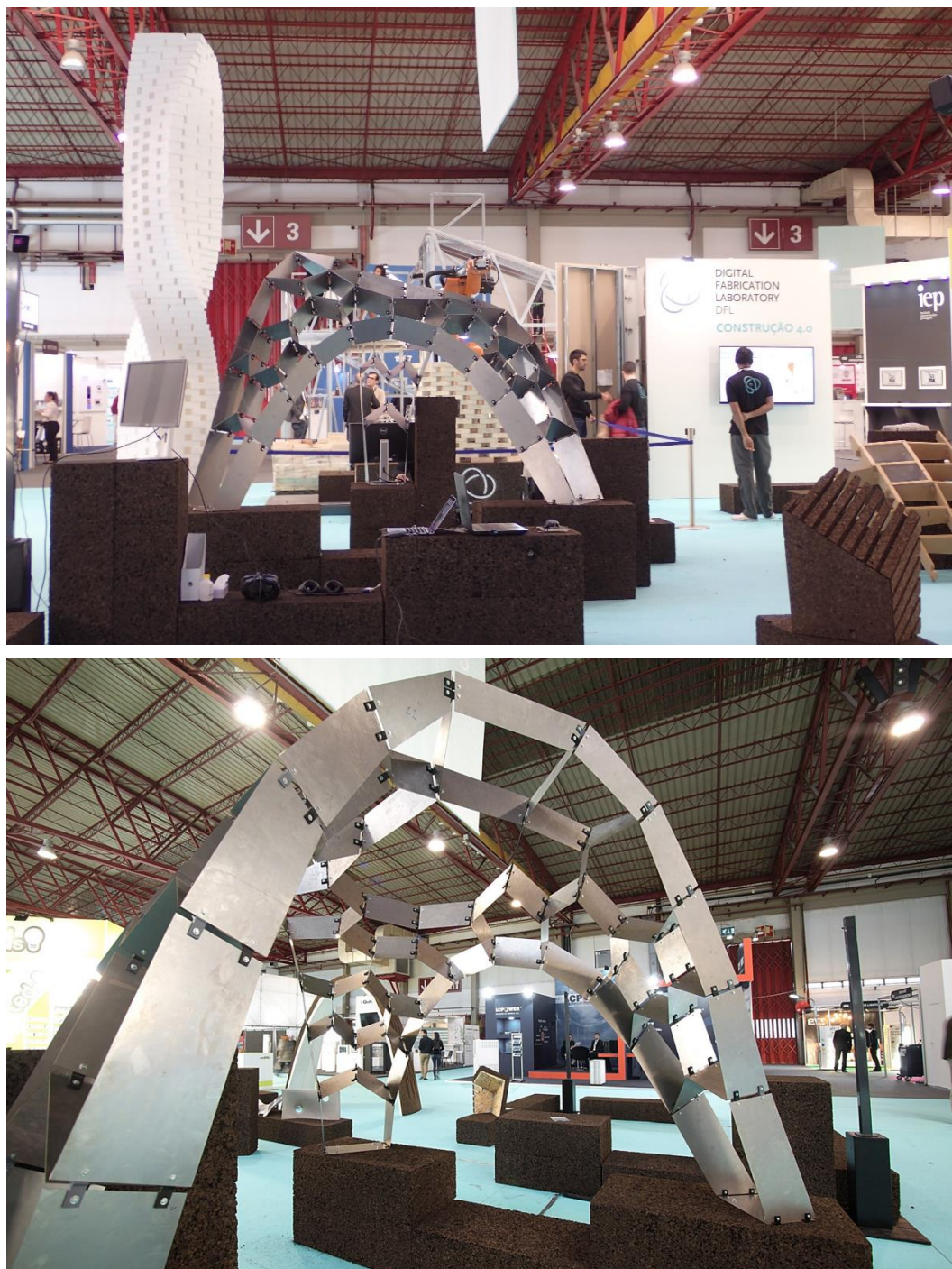


Figura 4.56 - Projeto “Tri-Arch”.



Figura 4.57 - Projeto “Tri-Arch”. Planos aproximados da estrutura (em cima); Plano geral do stand do DFL na feira da CONCRETA 2017 (em baixo).

Capítulo 5

Conclusão

5.1. Considerações

Neste trabalho, verificamos que a Fabricação Aditiva não é um método específico, singular ou restrito, mas sim um conjunto de tecnologias que operam sobre o mesmo princípio: o de adicionar seletivamente material por processos automatizados. Conforme foi abordado, esta denominação descreve um número vasto de métodos, cada qual com as suas especificidades e adaptados a várias aplicações. Estes métodos apresentam várias características intrínsecas ao seu processo de funcionamento, entre as quais: a grande liberdade geométrica, a eficiência material; a possibilidade de desenhar o preenchimento interior; e a produção de objetos num único processo e com uma única ferramenta. Ora, estas características permitem obter vantagens na produção, sobretudo quando comparadas a outros processos, quer sejam subtrativos ou formativos. E são estas vantagens que, tal como se verificou, têm vindo a ser exploradas nas mais diversas áreas que envolvem desenho e produção, entre as quais: a medicina, a engenharia automóvel, a aeronáutica, a moda, o desenho de produto ou o *design*, com finalidades de aplicação também muito diversificadas. Estas tecnologias estão a ser utilizadas não só na produção de protótipos de verificação em fases de projeto, dada a vantagem de construir modelos sempre diferentes uns dos outros de forma mais rápida, barata e com a precisão de um produto final, mas também na construção de ferramentas e moldes que apoiam e complementam outros processos de produção, criando peças adaptadas às necessidades momentâneas de produção. Mais recentemente, e em face do desenvolvimento tecnológico, verifica-se também um uso crescente da FA para a produção dos produtos finais. Neste âmbito, são visíveis algumas vantagens, como a produção personalizada, a variação em massa ou a produção descentralizada, que substitui as grandes fábricas por locais mais próximos dos consumidores, sendo que, no limite, apenas é comercializado o ficheiro digital e produzido pelos próprios.

Na Arquitetura, a FA tem vindo a ser frequentemente utilizada para a produção de maquetes. Foi a primeira aplicação nesta área, tal como a produção de protótipos noutras indústrias, devido ao desenvolvimento inicial da tecnologia. Desde o início da década de 90, verifica-se uma crescente utilização da FA em fases de projeto, e concretamente em alguns projetos experimentais. Desta forma, a reprodução imediata de modelos digitais pode ser vista como a conclusão do processo de digitalização do desenho da Arquitetura. Ao longo da dissertação vimos que esta

tecnologia apresenta algumas vantagens, comparativamente à forma tradicional de produção e maquetes manual, tais como:

- Esta ferramenta permite a reprodução imediata dos modelos tridimensionais, a partir da mesma informação dos desenhos rigorosos ou da modelação tridimensional utilizada para obter imagens foto-realistas do projeto. Esta questão torna o processo mais ágil, podendo ser tão importante como a utilização atual da impressão a jato de tinta dos desenhos de projeto.
- É possível identificar como uma mais-valia a libertação do arquiteto da execução de maquetes, facilitando a materialização de modelos geometricamente mais complexos, sem que estes estejam sujeitos à aptidão do executante. A capacidade de produzir modelos mais complexos, rigorosos e precisos acaba por ser uma ferramenta importante, quer em fases de processo, quer em modelos finais, visível nos dois exemplos apresentados no capítulo anterior.
- Da mesma forma, permite também testar mais hipóteses de projeto e a diferentes escalas. Atendendo a que o processo em Arquitetura é, em grande parte, na base da experimentação, a oportunidade de visualizar fisicamente um maior número de conceitos poderá levar o arquiteto a ter resultados mais consolidados nos seus projetos. Esta questão, assim como a aceleração do processo de desenho, é demonstrada através do exemplo da construção da *Sagrada Família*.
- É ainda compreensível que o processo de projeto de Arquitetura possa ser alterado com a integração das tecnologias de FA, pois influencia, desde uma fase inicial, a liberdade criativa e conceitual do arquiteto. Conforme vimos na maquete do *Guggenheim Museum* de Taichung, os arquitetos tiveram que encontrar uma solução que lhes permitisse representar o edifício projetado. Assim, e com base nesta medida, a materialização desse modelo possibilitou a demonstração das formas orgânicas que estavam a emergir no pensamento arquitetónico do Zaha Hadid Architects.

Na Arquitetura, e ao contrário de outras disciplinas, a passagem da materialização de modelos de conceção de projeto para o objeto final, neste caso o edifício, apresentam dificuldades particulares. É do senso comum que a Arquitetura e a construção são áreas que implicam uma grande complexidade de execução, pois utilizam uma grande quantidade e diversidade de

materiais, congregam um grande número de especialidades que envolvem muitas pessoas e implicam, tradicionalmente, um trabalho manual intensivo. Ao contrário de muitas das indústrias avançadas, a construção ainda não fez, por completo, a transição digital, quer ao nível do desenho, quer ao nível da utilização de processos mais eficientes, como a tecnologia de automação. Este atraso pode dever-se não só às características específicas desta área, mas também à indústria estabelecida no sector. Desta forma, e conforme analisado ao longo da presente dissertação, estes problemas também afetam a integração da FA na construção, sendo que foram identificados como principais dificuldades as questões da escala, do material e do local de obra. Ora, estes fatores implicam que as máquinas, para operarem nesta disciplina, precisam de sofrer grandes transformações, dispondo de sistemas capazes de construir com uma dimensão real, com materiais adequados à construção de edifícios e com suficiente versatilidade para poderem operar no local de obra e se adaptarem à multiplicidade de sistemas construtivos e especialidades naturais de uma obra de Arquitetura. Ainda assim, para lá das dificuldades, existem várias oportunidades para a construção com o uso destas tecnologias. E foram motivados por estas que, conforme se verificou, vários investigadores começaram a explorar sistemas específicos, inicialmente baseados em processos de extrusão para a deposição de betão. Esta é provavelmente uma das visões mais claras da utilização da FA, pois este é, no fundo, um processo que automatiza um dos métodos mais complexos e correntes na construção, com a clara vantagem de eliminar os moldes de cofragem, bem como o trabalho manual associado. Por isso, esta é a solução mais explorada até à data, tendo surgido inclusivamente, nos últimos anos, um crescente número de empresas a desenvolver este tipo de sistemas, antevendo aquilo a que se pode chamar de processo de industrialização.

Uma das principais preocupações da aplicação da FA é o contraste da simplicidade e natureza genérica deste processo, em comparação com a multiplicidade das lógicas construtivas da Arquitetura. Todavia, verificou-se que também os arquitetos quiseram intervir neste novo campo, através da investigação destas tecnologias, não só através do desenvolvimento de projetos para serem materializados por tecnologia genérica, mas também por meio da investigação de sistemas próprios que vão ao encontro de soluções específicas e de alternativas à deposição. Estes sistemas, para além da preocupação do desenvolvimento da automação como um meio mais eficiente de construção, foram movidos pelas oportunidades e pela busca de uma materialidade digital para desenvolver novos conceitos de Arquitetura.

Na Arquitetura e na Construção, os sistemas de FA foram utilizados para diferentes finalidades, desde a produção de componentes finais, à produção de moldes, moldes para cofragem perdida

ou, até mesmo, elementos estruturais. As capacidades que a tecnologia atribuiu à produção noutras áreas, são também verificadas na aplicação à construção de edifícios e fabricação de componentes construtivos. Com base nas características atribuídas pela FA ao desenho e à materialidade, e pela verificação das mesmas nos projetos demonstrados no capítulo 4, é possível resumir as oportunidades da FA para a Arquitetura e para a Construção nos seguintes pontos:

- A construção de um edifício é uma das atividades de produção que utiliza grandes quantidades de material, provocando, com isso, um grande desperdício. A FA tem a particularidade de produzir com desperdício quase nulo, ao contrário do que acontece, por exemplo, nas técnicas de subtração, visíveis em praticamente todos os exemplos apresentados por esta tecnologia. Deste modo, a eficiência material pode ser uma das questões mais relevantes na indústria da construção, pois torna-a num processo mais ecológico e limpo. A problemática ecológica poderá ser melhorada, tal como afirmam os autores da tecnologia desenvolvida pela WinSun, pelos Dus Architects e FreeFab, através da utilização de materiais reciclados, inclusivamente de outras construções, originando um ciclo contínuo de reaproveitamento.
- No que concerne à eficiência material, a FA, ao utilizar apenas o material necessário, permite desenhar com um grande intuito na otimização, quer seja em termos materiais, funcionais e/ou estruturais. Esta característica é visível em alguns dos projetos aqui demonstrados, como os *Node* da Arup ou na investigação do Block Research Group.
- O modo de transformação do material é uma das características únicas das técnicas de Fabricação Aditiva. Por esta razão, que com base nestas técnicas, é permitido alterar algumas propriedades dos materiais ou programar a gradação e combinação de materiais, produzindo objetos de materialidade heterogénea. Na Arquitetura, os elementos construtivos são, geralmente, compostos por diversos componentes de materiais diferentes, cuja conjugação permite obter uma determinada função ou intenção de projeto. Ora, a FA pode constituir uma forma alternativa de operar, abrindo assim um novo paradigma, onde o desenho vai até ao material. Esta característica pode ser aplicada de uma forma funcional, como no caso do *Variable Density Concrete*.
- Através das experiências dos Emerging Objects, foi possível verificar a aplicação de materiais que não são habituais na disciplina da Arquitetura e Construção. Assim, a

própria personalização da obra de Arquitetura poderá estender-se até à materialidade, permitindo ao arquiteto aplicar, de uma forma mais profunda, as suas intenções.

- Como já foi abordado, uma das particularidades da Fabricação Aditiva é a capacidade de construir praticamente qualquer geometria. O desenho de projeto sempre foi condicionado, desde as fases de processo, pelas tecnologias de produção e construção. No entanto, as tecnologias de FA podem abrir um precedente único, em que a principal dificuldade já não está na materialização, mas no desenho. Esta mudança de paradigma, à semelhança da introdução das tecnologias CAD, poderá influenciar o desenho da Arquitetura. Novas soluções de desenho poderão emergir, apoiadas na computação, tal como exemplifica o projeto *Digital Grotesque*.
- Por outro lado, na Arquitetura, que é uma indústria cujo objeto da sua produção é quase sempre diferente e único, é difícil compreender como são tão poucas as soluções de construção específicas, estando o arquiteto restrito à padronização disponível pela indústria, já que parte do seu trabalho passa pela escolha de produtos. Esta é uma das áreas com maior potencial de integração da FA na Arquitetura, pela capacidade que oferece ao desenho de componentes, sem que a personalização do projeto tenha custos acrescidos. Assim, uma das possibilidades abertas por esta tecnologia é a produção variável em série, comprovada, por exemplo, no projeto da linha de metro Elizabeth, em Londres.
- Através do desenho, pode ser possível encontrar formas de simplificar os elementos construtivos, tal como já referia Joseph Pegna em 1997. Esta questão é visível, por exemplo, no projeto *Spong3d*, com a consolidação de várias funções que, convencionalmente, seriam alcançáveis por inúmeros componentes, mas que, neste caso, é feito apenas num único elemento.
- É do senso comum que a construção de edifícios é um processo complexo, onde interagem muitas especialidades. Deste modo, as tecnologias de FA poderão intervir como um sistema construtivo mais eficiente, tal como o projeto *Mesh Mould*, em que a FA permitiu uma consolidação de processos construtivos. A eficiência também pode ser vista pela característica de automação do processo. A automação pode tornar a construção mais eficiente, com mão de obra menos intensiva, alterando a construção no local de obra, quer pelo uso de sistemas de deposição no local, como antevê o *Contour*

Crafting, quer pela produção pré-fabricada de grande parte dos elementos, de forma descentralizada e junto à construção, verificado com a experiência da empresa WinSun ou nos trabalhos dos Dus Architects. A redução de custos resultante da automação, aclamada por alguns autores, também poderá ser um fator importante para a materialização das intenções do arquiteto.

Concluindo, esta tecnologia pode intervir de forma oportuna nos diversos âmbitos da Arquitetura, desde o processo de desenho até à construção efetiva de edifícios, sendo uma das ferramentas que melhor personifica o *contínuo digital* de Kolarevic (2003), na presença integrada das tecnologias digitais no processo de produção, enquanto característica mais profunda de grande parte da Arquitetura contemporânea. Este processo, tal como outros, têm as suas vantagens e desvantagens de utilização, de tal modo que a enumeração das oportunidades não pretende demonstrar que esta é uma técnica perfeita, mas sim caracterizar a FA como uma nova forma de construção emergente. Da mesma forma que se verificaram outros saltos tecnológicos no passado, esta tecnologia poderá originar novas formas de pensar. A Fabricação Aditiva emerge apenas como mais um meio disponível para a Arquitetura e para os arquitetos materializarem as suas intenções. Contudo, ainda não é perceptível, ao certo, qual será o impacto real que a utilização destas tecnologias terá no desenho da Arquitetura.

5.2. Especulação

O intuito desta dissertação nunca foi a especulação, porém, diante da fase embrionária e emergente da Aplicação da Fabricação Aditiva na Arquitetura, afigura-se relevante refletir sobre quais serão os próximos passos. É expectável que, ao longo dos próximos anos, a tecnologia de FA em geral continue a evoluir e a melhorar os seus aspetos técnicos, entre os quais a velocidade. Nesta medida, tais desenvolvimentos poderão refletir-se também na sua aplicação à Arquitetura. Provavelmente continuará a acompanhar a tendência de democratização da tecnologia, sendo expectável uma presença crescente destas máquinas em gabinetes de projeto. Já na Construção, espera-se a continuação do desenvolvimento de tecnologias específicas. Neste âmbito, parece mais previsível que, num futuro próximo, a FA venha a atuar com sistemas baseados num método automatizado para cofragem de betão, sobretudo em termos de pré-fabricação; num sistema híbrido, combinado com outras tecnologias de produção, tirando partido da deposição seletiva da FA e da velocidade de acabamento, por exemplo, da fresagem; na sua

utilização, com tecnologia genérica, para a produção de moldes precisos e geometricamente complexos e produção de séries de componentes em materiais como o metal. Estas técnicas poderão, em breve, desencadear a industrialização da FA. Para além do desenvolvimento de máquinas, é possível que aumente o interesse na exploração de desenhos para a Arquitetura, testando as capacidades de produção desta tecnologia. E é precisamente este último ponto que poderá levantar algumas questões na disciplina da Arquitetura.

Para além das oportunidades que a FA poderá trazer à conceção atual da Arquitetura, outras preocupações sobre a forma como entendemos esta disciplina poderão surgir ao utilizar estes métodos para construir. Partindo da hipótese de se vir a materializar projetos de Arquitetura com estes métodos, e tendo em conta as suas características identificadas anteriormente, foram formuladas três questões para elucidar as problemáticas que poderão ser levantadas e, consequentemente, contribuir para um empobrecimento da disciplina: *que repercussões terá o excesso de liberdade geométrica? produção ou reprodução? como se aplicará o conceito de tónica?*

- Tal como na afirmação do desenho CAD tridimensional, as tecnologias de Fabricação Digital levaram a que, na Arquitetura Contemporânea, surgissem inúmeros projetos com “*smooth architectures*” (Kolarevic 2003: 6). A Fabricação Aditiva poderá levar ainda mais longe a vontade de alguns arquitetos experimentarem geometrias cada vez mais complexas, não euclidianas. A libertação dos constrangimentos de materialização desencadeará, porventura, a procura por soluções mais avançadas, baseadas em modelos biológicos e computacionais, sem descurar, todavia, do impacto que esta nova realidade poderá ter na Arquitetura, na medida em que este excesso de liberdade possa também levar a um exagero no detalhe. Se, no passado, a ornamentação representava a importância dos edifícios, porém abandonada na Era Moderna, hoje representará o luxo desmedido do desenho e do algoritmo, não existindo custos na materialização da figuração, podendo ir de encontro ao que se pode chamar de uma *ornamentação digital*, visível, por exemplo, no projeto *Digital Grotesque*. Poderá, ainda, ser expressão de que a Arquitetura será levada pela otimização e eficiência funcional, numa espécie de *super funcionalismo*, como nos *Node* da Arup. Nestes dois casos a intuição da obra de Arquitetura pode ficar restringido ao desenho da estética ou da função.
- Decorrente da liberdade de produção oferecida pela tecnologia, à semelhança de alguns exemplos de objetos disponíveis em ficheiros digitais na internet para serem

produzidos por FA, como visto no Capítulo 2, um fenómeno idêntico poderá ocorrer na construção de edifícios. Para fins económicos, a produção poderá dar lugar à *reprodução* e à *cópia*, em que, através de tecnologias digitais, como a modelação paramétrica, com a FA será mais fácil construir edifícios pré-desenhados (em vez de pré-fabricados), numa espécie de produção variável em série. Por suposição, construir um edifício nestes moldes seria idêntico a descarregar uma música na internet. Esta possibilidade da cópia e da reprodução, caso algum dia se concretize, poderá ser uma afronta ao trabalho do arquiteto e ao carácter singular da obra de Arquitetura.

A noção de tectónica de Kenneth Frampton (1995) vê a Arquitetura como a habilidade de construir, já que tem tanto de estrutura e construção como de espaço e forma. Sempre (2010) enfatiza a “junção” como um dos aspetos mais fundamentais da tectónica, sugerindo métodos para vários materiais. Partindo da noção clássica da relação entre a parte e o todo, assim como da conjugação construtiva convergente com o *topos* e o *typos* (Frampton e Cava 1995: 2), poderá haver dificuldade em enquadrar alguns aspetos de intervenção da tecnologia de FA na Arquitetura. Como visto anteriormente, a liberdade de desenho e a possibilidade de produzir peças não estruturais nem construtivas podem levar a um confronto na noção moderna de Arquitetura, entre figuração/ornamentação e construção/tectónica. Por outro lado, a “junção” dos elementos da FA é bastante diferente na noção comum. Se pensarmos num pequeno edifício feito na totalidade por FA, como proposto na investigação *Contour Crafting*, a junção dos elementos é, em grande parte, feita pelo carácter genérico da deposição do material, camada sobre camada, passando essas a ser a expressão construtiva. Mas, por outro lado, essa expressão poderá mesmo quase nem existir, devido à tendência da diminuição da *resolução* do processo, ficando apenas uma superfície lisa, como nas lajes do Block Research Group, agravado também pela capacidade de garantir as funcionalidades de habitação num único sistema, como no projeto *Sponge3d* ou na construção quase integral dos projetos dos DUS Architects, que demonstram a tendência da exploração de construções mono-materiais. Ora, esta abordagem de explorar a padronização metodológica para beneficiar as geometrias *non-standard*, onde o projeto é apenas geometria em detrimento da expressão construtiva, pode constituir um risco para o empobrecimento da Arquitetura.

Estas perguntas demonstram que, a par das numerosas vantagens que poderão surgir com a utilização da FA para a construção de Arquitetura, surgirão certamente outras desvantagens. Desta forma, apesar desta técnica ser capaz de oferecer uma grande liberdade geométrica na materialização, bem como uma grande eficiência material, o carácter genérico de fabricação, característico de algumas destas tecnologias, pode esgotar a grande complexidade e a multiplicidade de lógicas construtivas da disciplina. Todavia, é certo que, identificados alguns destes problemas, poderão surgir soluções específicas para as problemáticas da Arquitetura.

5.3. Investigação futura

A investigação neste trabalho foi, essencialmente, uma tomada de consciência deste novo meio de fabricação na Arquitetura e uma reflexão das oportunidades que poderão surgir com a sua integração na disciplina. Em termos práticos, esta investigação poderá continuar em diferentes áreas pertinentes, desde o desenho avançado para a exploração das características de fabricação da tecnologia, à experimentação de vários tipos de técnicas, inclusivamente aquelas que utilizam materiais reais de construção e à grande escala, ou, até mesmo, através de parcerias, investigar e desenvolver a tecnologia de Fabricação Aditiva para aplicação na construção real.

Enquanto futuro arquiteto, os principais contributos que retiro desta experiência, não são apenas as questões específicas e técnicas da FA, mas também o conhecimento que obtive através do modo como se deve operar na utilização das tecnologias por meio da informação digital. Desta forma, assumi uma nova consciência de projeto, sabendo que é necessário, desde uma fase inicial, desenhar para a materialização e para a expressão que o processo de produção irá dar à obra de Arquitetura. Outro fator que me motivou foi novo papel emergente do arquiteto, designado por Kolarevic (2003: 6) como “*Information Master Builders*”. Trata-se, no fundo, de um regresso às origens da prática da Arquitetura, onde o arquiteto tem um papel central não só no desenho, mas também na construção, e, porque dotado pelas novas ferramentas de materialização digital, torna-se independente para poder fabricar os seus próprios conceitos, investigar e desenvolver processos de fabricação viáveis e alcançar Arquiteturas próprias *non-standard*, contribuindo, assim, para o enriquecimento da materialidade e da tectónica da Arquitetura.

Lista de Acrónimos

3D	Tridimensional
3DP	Impressão Tridimensional
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais
CAD	Desenho Assistido por Computador
CAE	Engenharia Assistida por Computador
CAM	Manufaturação Assistida por Computador
CEAU	Centro de Estudos de Arquitetura e Urbanismo
CNC	Controlo Numérico Computorizado
DFL	Digital Fabrication Laboratory
FA	Fabricação Aditiva
FAUP	Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto
FDM	Modelação por Extrusão de Plástico
GRC	Betão Reforçado com Fibra de Vidro
IJUP	Investigação Jovem da Universidade do Porto
ISO	Organização Internacional de Normalização
LOM	Fabricação de Objetos por Camadas
PETG	Polietileno Tereftalato de Glicol
PLA	Plácido Láctico
SLA	Estereolitografia
SLS	Sinterização Seletiva por Laser
STL	Formato de Ficheiro (Stereolithography Tessellation Language)
UV	Raios UltraVioleta

Bibliografia

- Abreu, Sofia. 2015. “Impressão 3D baixo custo versus impressão em equipamentos de elevado custo”. Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Aejmelaesus-Lindström, Petrus, Ammar Mirjan, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Schendy Kernizan, Björn Sparrman, Jared Laucks, e Skylar Tibbits. 2017. “Granular Jamming of Loadbearing and Reversible Structures: Rock Print and Rock Wall”. *Architectural Design* 87 (4): 82–87.
- Aejmelaesus-Lindström, Petrus, Jan Willmann, Skylar Tibbits, Fabio Gramazio, e Matthias Kohler. 2016. “Jammed Architectural Structures: Towards Large-Scale Reversible Construction”. *Granular Matter* 18 (2): 28.
- Alves, Fernando J. L., Fernando J. S. Braga, Manuel S. Simão, Rui J. L. Neto, e Teresa M. G. P. Duarte. 2001. *PROTOclick!* INEGI.
- Atkinson, Paul, Lionel Theodore Dean, Barnsley Design Centre, Dean Clough Galleries. 2003. “Future Factories: Design Work by Lionel Theodore Dean”. Em . Huddersfield: University of Huddersfield.
- Baese, Carlo. 1902. Photographic process for the reproduction of plastic objects. US 774549A, acedido a 17 de Maio de 1902. <https://patents.google.com/patent/US774549A/en>.
- Barclift, Michael, e Williams, Christopher. 2012. “Examining variability in the mechanical properties of parts manufactured via polyjet direct 3D printing”. *23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, SFF 2012*, Janeiro.
- Blather. 1892. Manufacture of contour relief-maps. US 473901A, acedido a 3 de Maio de 1892. <https://patents.google.com/patent/US473901A/en>.
- Block, Philippe, Matthias Rippmann, e Tom Van Mele. 2017. “Compressive Assemblies: Bottom-Up Performance for a New Form of Construction”. *Architectural Design* 87 (4): 104–9.
- Bock, Thomas, and Thomas Linner. 2016. *Site Automation: Automated/Robotic on-Site Factories*. The Cambridge Handbooks in Construction Robotics. New York: Cambridge University Press.
- Bock, Thomas, and Silke Langenberg. 2014. ‘Changing Building Sites: Industrialisation and Automation of the Building Process’. *Architectural Design* 84 (3): 88–99.
- Bourell, David, Joseph Beaman, Ming Leu, e David Rosen. 2009. “A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: Looking back and looking ahead”. *Proceedings of RapidTech*, 2009.
- Burry, M. 2002. “Rapid Prototyping, CAD/CAM and Human Factors”. *Automation in Construction* 4 (11): 313–33.
- Burry, Mark, Jane Burry, e Jordi Faulí. 2001. “Sagrada Família Rosassa: Global Computer- aided Dialogue between Designer and Craftsperson (Overcoming Differences

in Age, Time and Distance)”. *Reinventing the Discourse - How Digital Tools Help Bridge and Transform Research, Education and Practice in Architecture: Proceedings of the Twenty First Annual Conference of the Association for Computer-Aided Design in Architecture*, 76–086.

- Carvalho, João, e José Pedro Sousa. 2018. “Additive Fabrication in Architecture. The “TriaArch” project.” Em , Book of Abstracts:26.
- Ceccanti, F, E Dini, Xavier De Kestelier, Valentina Colla, e L Priami. 2009. “3D printing technology for a moon outpost exploiting lunar soil”. Em . Praga, República Checa: International Astronautical Federation.
- Cesaretti, Giovanni, Enrico Dini, Xavier De Kestelier, Valentina Colla, e Laurent Pambaguian. 2014. “Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology”. *Acta Astronautica* 93 (Janeiro): 430–50.
- Daly, Andrew C., Gráinne M. Cunniffe, Binulal N. Sathy, Oju Jeon, Eben Alsberg, e Daniel J. Kelly. 2016. “3D Bioprinting of Developmentally Inspired Templates for Whole Bone Organ Engineering”. *Advanced Healthcare Materials* 5 (18): 2353–62.
- De Kestelier, X. 2012. “Design Potential for Large Scale Additive Fabrication: Freeform”. Foster + Partners, Research and Development Group.
- De Kestelier, Xavier, e Richard A. Buswell. 2009. “A Digital Design Environment for Large- Scale Rapid Manufacturing”. Em *reForm() - Building a Better Tomorrow*, 201–8. Chicago, Illinois: The School of the Art Institute of Chicago: ACADIA.
- De Kestelier, Xavier, Enrico Dini, Giovanni Cesaretti, Valentina Colla, e Laurent Pambaguian. 2015. “Lunar Outpost Design: 3D printing regolith as a construction technique for environmental shielding on the moon”. *Foster + Partners, Research and Development Group*, 2015.
- Deplazes, Andrea. 2008. *Constructing Architecture: Materials Processes Structures a Handbook*. 2ª ed. Basel: Birkhäuser.
- Dillenburger, Benjamin, e Michael Hansmeyer. 2013. “The Resolution of Architecture in the Digital Age”. Em *Global Design and Local Materialization*, 347–57. Communications in Computer and Information Science. Springer, Berlin, Heidelberg.
- DiMatteo, Paul L. 1974. Method of generating and constructing three-dimensional bodies. US 3932923A, acessado a 21 de Outubro de 1974. <https://patents.google.com/patent/US3932923A/en>.
- Dini, Enrico, Moreno Chiarugi, e Roberto Nannini. 2008. Method and Device for Building Automatically Conglomerate Structures. United States US20080148683A1, filed 16 de Março de 2006, e acessado a 26 de Junho de 2008. <https://patents.google.com/patent/US20080148683/en>.
- Dolhan, Valentin Dolhan. 2013. “3D Printing in Architecture, a Current State of the Industry with Past and Future Perspective”. BSc of Architectural Technology & Construction Management, Horsens, Denmark: VIA University College.
- Dörfler, Kathrin, Sebastian Ernst, Luka Piskorec, Jan Willmann, Volker Helm, Fabio Gramazio, e Matthias Kohler. 2014. “Remote Material Deposition: Exploration of Reciprocal Digital and Material Computational Capacities”. Em , 361–77. Barcelona, Espanha.
- Duarte, José Pinto. 2001. “Customizing Mass Housing : A Discursive Grammar for Siza’s Malagueira Houses”. Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Fischer, Thomas and Christiane M. Herr. 2016. “Parametric Customisation of A 3D Concrete Printed Pavilion”. Em *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous*

Designing, Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016) / Melbourne 30 March–2 April 2016, pp. 549-558. CUMINCAD.

- Frampton, Kenneth, e John Cava. 1995. *Studies in Tectonic Culture: The Poetics in the Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture*. Cambridge, Mass: The MIT Press.
- Galjaard, Salomé, Sander Hofman, Neil Perry, e Shibo Ren. 2015. “Optimizing Structural Building Elements in Metal by Using Additive Manufacturing”. Em . Amsterdam, The Netherlands: International Association for Shell and Spatial Structures (IASS).
- Gardiner, J. 2011. “Exploring the Emerging Design Territory of Construction 3D Printing - Project Led Architectural Research”. PhD, Melbourne, Australia: RMIT University.
- Gardiner, James. 2014. Method for Fabricating a Composite Construction Element. US15503850, acessado a 15 de Agosto de 2014. <https://patents.google.com/patent/US20170274556A1/en>.
- Gardiner, James, Steve Janssen, e Nathan Kirchner. 2016. “A Realization of a Construction Scale Robotic System for 3D Printing of Complex Formwork”.
- Gibson, Ian, Thomas Kvan, e Ling Wai Ming. 2002. “Rapid Prototyping for Architectural Models”. *Rapid Prototyping Journal* 8 (2): 91–95.
- Gibson, Ian, David Rosen, e Brent Stucker. 2015. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2.^a ed. New York: Springer-Verlag.
- Gramazio, Fabio, e Matthias Kohler. 2008. *Digital Materiality in Architecture*. 1 edition. Baden: Lars Muller.
- Gramazio, Fabio, Matthias Kohler, e Michael Budig. 2013. “The Tectonics of 3D Printed Architecture”. *Gazette*, n. 19.
- Hack, Norman, e Willi Viktor Lauer. 2014a. “Mesh-Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork”. *Architectural Design* 84 (3): 44–53.
- Hack, Norman, Willi Viktor Lauer, Fabio Gramazio, e Matthias Kohler. 2015. “Mesh Mould: Robotically Fabricated Metal Meshes as Concrete Formwork and Reinforcement”. Em *FERRO-11: Proceedings of the 11th International Symposium on Ferrocement and 3rd ICTRC International Conference on Textile Reinforced Concrete*, 347–59. RILEM Publications SARL.
- Hack, Norman, Willi Viktor Lauer, Willi Viktor Lauer, Fabio Gramazio, e Matthias Kohler. 2014b. “Mesh Mould: Differentiation for Enhanced Performance”. Em *Rethinking Comprehensive Design: Speculative Counterculture, Proceedings of the 19th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2014) / Kyoto 14-16 May 2014, pp. 139–148. CUMINCAD.*
- Hansmeyer, M., e B. Dillenburger. 2014. “Printing Architecture: Castles Made Of Sand”. Em . Zurich.
- Hopkinson, N, R. J. M Hague, P. M Dickens, e John Wiley & Sons. 2006. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Chichester, England: John Wiley..
- Housholder, Ross F. 1979. Molding process. US 4247508B1, acessado a 3 de Dezembro de 1979. <https://patents.google.com/patent/US4247508B1/en>.
- Hull, Charles W. Hull. 1984. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US4575330A, acessado a 8 de Agosto de 1984.

<https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>.

- Iwamoto, Lisa. 2009. *Digital fabrications: architectural and material techniques*. Architecture briefs. New York: Princeton Architectural Press.
- Jones, Rhys, Patrick Haufe, Edward Sells, Pejman Iravani, Vik Olliver, Chris Palmer, e Adrian Bowyer. 2011. “RepRap – the Replicating Rapid Prototyper”. *Robotica* 29 (01): 177–91.
- Keating, Steven J., Julian C. Leland, Levi Cai, e Neri Oxman. 2017. “Toward Site-Specific and Self-Sufficient Robotic Fabrication on Architectural Scales”. *Science Robotics* 2 (5): eaam8986. <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aam8986>.
- Khoshnevis, Behrokh. 2004. “Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies”. *Automation in Construction*, The best of ISARC 2002, 13 (1): 5–19.
- Khoshnevis, Behrokh, Dooil Hwang, Ke-Thia Yao, e Zhenghao Yeh. 2006. “Mega-scale fabrication by Contour Crafting”. *International Journal of Industrial and Systems Engineering* 1 (3): 301–20.
- Klein, John, Michael Stern, Giorgia Franchin, Markus Kayser, Chikara Inamura, Shreya Dave, James C. Weaver, et al. 2015. “Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass”. *3D Printing and Additive Manufacturing* 2 (3): 92–105.
- Koizumi, M. 1997. “FGM Activities in Japan”. *Composites Part B: Engineering* 28 (1–2): 1–4.
- Kolarevic, Branko. 2001. “Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age”. Em . Buffalo, New York: SUNY Buffalo.
- Kolarevic, Branko, ed. 2003. *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*. Reprint. New York: Taylor & Francis.
- Kruth, J. -P., M. C. Leu, e T. Nakagawa. 1998. “Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping”. *CIRP Annals* 47 (2): 525–40.
- Kvan, Thomas, e Branko Kolarevic. 2002. “Rapid Prototyping and Its Application in Architectural Design”. *Automation in Construction* 11 (3): 277–78.
- Liew, A., D. López López, T. Van Mele, e P. Block. 2017. “Design, Fabrication and Testing of a Prototype, Thin-Vaulted, Unreinforced Concrete Floor”. *Engineering Structures* 137 (Abril): 323–35.
- Lim, S., R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, e T. Thorpe. 2012. “Developments in construction-scale additive manufacturing processes”. *Automation in Construction* 21 (Janeiro): 262–68.
- Lim, Sungwoo, Richard A. Buswell, Philip J. Valentine, Daniel Piker, Simon A. Austin, e Xavier De Kestelier. 2016. “Modelling curved-layered printing paths for fabricating large-scale construction components”. *Additive Manufacturing*, Special Issue on Modeling & Simulation for Additive Manufacturing, 12 (Outubro): 216–30.
- Lindsey, Bruce, e Antonino Saggio. 2001. *Digital Gehry: Material Resistance. Digital Construction*. The IT Revolution in Architecture. Basel: Birkhäuser.
- López, David, Diederik Veenendaal, Masoud Akbarzadeh, e Philippe Block. 2014. “Prototype of an ultra-thin, concrete vaulted floor system”. Em . Brasília, Brazil.
- Lynn, Greg. 1999. *Animate Form*. New York: P.A.P.
- Malé Alemany, Marta. 2016. “El potencial de la fabricación aditiva en la arquitectura : hacia un nuevo paradigma para el diseño y la construcción”. Ph.D. Thesis, Universitat

Politécnica de Catalunya.

- Mayer, Siegfried. 2009. “Optimised mould temperature control procedure using DMLS”. *Whitepaper, EOS GmbH Electro Optical Systems, Robert-Stirling-Ring 1, D-82152 Krailling/Munich, www.eos.info*, 2009.
- Mitchell, William J. 1977. *Computer-Aided Architectural Design*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Mitchell, William J., e Malcolm McCullough. 1995. *Digital Design Media*. 2 nd. New York: John Wiley & Sons.
- Modeen, Thomas. 2005. “CADCAMing: The use of rapid prototyping for the conceptualization and fabrication of architecture”. *Automation in Construction*, Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2003), Digital Design, 14 (2): 215–24.
- Munoz-Abraham, Armando Salim, Manuel I. Rodriguez-Davalos, Alessandra Bertacco, Brian Wengerter, John P. Geibel, e David C. Mulligan. 2016. “3D Printing of Organs for Transplantation: Where Are We and Where Are We Heading?” *Current Transplantation Reports* 3 (1): 93–99.
- Munz, Otto John. 1951. Photo-glyph recording. US 2775758A, acedido a 25 de Maio de 1951.
- Murphy, Sean, e Anthony Atala. 2014. “3D Bioprinting of Tissues and Organs”. *Nature biotechnology* 32 (Agosto).
- Newman, William M., e Robert F. Sproull. 1979. *Principles of Interactive Computer Graphics*. New York : McGraw-Hill. <http://archive.org/details/principlesofinter00newm>.
- Oxman, Neri. 2010. “Material-based design computation”. PhD, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture.
- Oxman, Neri. 2011. “Variable Property Rapid Prototyping”. *Virtual and Physical Prototyping* 6 (1): 3–31.
- Oxman, Neri, Steven Keating, e Elizabeth Tsai. 2011. “Functionally Graded Rapid Prototyping”. Em . Leiria, Portugal.
- Palladio, Andrea, e Adolf Placzek. 1965. *The Four Books of Architecture*. New York: Dover.
- Pegna, Joseph. 1997. “Exploratory investigation of solid freeform construction”. *Automation in Construction* 5 (5): 427–37.
- Perera, Bamunuarchige Victor. 1937. Process of making relief maps. US 2189592A, acedido a 11 de Março de 1937. <https://patents.google.com/patent/US2189592A/en>.
- Peters, Brady, e Xavier De Kestelie. 2008. “Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing at Foster + Partners”. Em *Silicon + Skin: Biological Processes and Computation, [Proceedings of the 28th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) / ISBN 978-0-9789463-4-0] Minneapolis 16-19 October 2008*, 382-389. CUMINCAD.
- Peters, Brady, e Xavier Kestellier. 2006. “The Work of Foster and Partners Specialist Modelling Group”. Em . London: Tarquin Publications.
- Pham, D. T, e R. S Gault. 1998. “A comparison of rapid prototyping technologies”. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (10): 1257–87.
- Prat, Ramon, Museu de les Arts Decoratives, e Institut de Cultura, eds. 2012. *Fabvolution: Developments in Digital Fabrication*. Barcelona: Ajuntament de Barcelona.

- Rael, R, e Virginia San Fratello. 2011. “Developing concrete polymer building components for 3D printing”, Janeiro, 152–57.
- Rael, Ronald, e Virginia San Fratello. 2017. “Clay Bodies: Crafting the Future with 3D Printing”. *Architectural Design* 87 (Novembro): 92–97.
- Redwood, Ben, Filemon Schöffner, e Brian Garret. 2017. *The 3D Printing Handbook: Technologies, Design and Applications*. Amsterdam: 3D HUBS.
- Relvas, Carlos. 2002. “Processos de prototipagem rápida no fabrico de modelos de geometria complexa: estudo realizado sobre o modelo anatómico da mão”. Mestrado Design Industrial, Porto, Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Rippmann, M., A. Liew, T. Van Mele, e P. Block. 2018. “Design, Fabrication and Testing of Discrete 3D Sand-Printed Floor Prototypes”. *Materials Today Communications* 15 (Junho): 254–59.
- Rotheroe, Kevin Chaite. 2002. “The Freeform Fabrication of Structurally Optimized and Complexly-Shaped Metal Tubular Components”. Em *Solid Freeform Fabrication Proceedings, SFF Symposium, August 5-7, 2002*. Austin, Texas.
- Ryder, Gerard, Bill Ion, Graham Green, David Harrison, e Bruce Wood. 2002. “Rapid design and manufacture tools in architecture”. *Automation in Construction, Rapid Prototyping*, 11 (3): 279–90.
- Sabin, Jenny E. 2010. “Digital Ceramics: Crafts-based Media for Novel Material Expression & Information Mediation at the Architectural Scale”. Em *ACADIA 10: LIFE in:formation, On Responsive Information and Variations in Architecture [Proceedings of the 30th Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture (ACADIA) ISBN 978-1-4507-3471-4] New York 21-24 October, 2010*, pp. 174-182. CUMINCAD.
- Sánchez, J., J. Gonzalez Prada, e A. Oyarbide. 2005. *Using Rapid Prototyping for Free-Form Shapes in Architectural Scale Models*.
- Sarakinioti, Maria Valentini, Michela Turrin, Thaleia Konstantinou, Martin Tenpierik, e Ulrich Knaack. 2018b. “Developing an integrated 3D-printed façade with complex geometries for active temperature control”. *Materials Today Communications* 15 (Junho): 275–79.
- Sarakinioti, Maria Valentini, Michela Turrin, M Teeling, Paul De Ruiter, Mark Van Erk, Martin Tenpierik, Thaleia Konstantinou, et al. 2017. “Spong3d: 3D Printed Facade System Enabling Movable Fluid Heat Storage”. *SPOOL, Vol 4 No 2: Energy Innovation #4*, Dezembro.
- Sarakinioti, Maria-Valentini, Thaleia Konstantinou, Michela Turrin, Martin Tenpierik, Roel Loonen, Marie L. De Klijn-Chevalerias, e Ulrich Knaack. abril 13, 2018a. “Development and Prototyping of an Integrated 3D-Printed Façade for Thermal Regulation in Complex Geometries”. *Journal of Facade Design and Engineering, Vol 6 No 2: ICAE2018 Special Issue*.
- Sass, Larry. 2003. “Rule Based Rapid Prototyping of Palladio’s Villa Detail”. Em , editado por European Conference on Education in Computer Aided Architectural Design e Wolfgang Dokonal, 649–52. ECAADe: Conferences. Graz, Austria: Graz University of Technology.
- Sass, Larry, e Rivka Oxman. 2006. “Materializing Design: The Implications of Rapid Prototyping in Digital Design”. *Design Studies* 27 (3): 325–55. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2005.11.009>.
- Sass, Larry. s.d. “Materializing Palladio’s Ideal Villas”.

- Sass, Larry. 2000. "Reconstructing Palladio's Villas : An Analysis of Palladio's Villa Design and Construction Process". Thesis, Massachusetts Institute of Technology. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/32701>.
- Schumacher, Patrick, e Gordana Fontana-Giusti. 2004. *Zara Hadid Complete Works*. 1st ed. Vol. 2. London: Thames & Hudson.
- Schumacher, Patrik. 2004. *Digital Hadid: Landscapes in Motion*. The IT Revolution in Architecture. Basel: Birkhäuser.
- Seely, Jennifer C. K. 2004. "Digital Fabrication in the Architectural Design Process". Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Semper, Gottfried, Harry Francis Mallgrave, e Wolfgang Herrmann. 2010. *The Four Elements of Architecture and Other Writings*. Cambridge: University Press.
- Simondetti, Alvise. 1997. "Rapid Prototyping in Early Stages of Architectural Design". Thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Sousa, José Pedro. 2010. "From Digital to Material. Rethinking Cork in Architecture through the use of CAD/CAM technologies". PhD Thesis in Architecture, Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa Instituto Superior Técnico.
- Sousa, José Pedro, Pedro Azambuja Varela, João Carvalho, Rafael Santos, e Manuel Oliveira. 2018. "Mass-customization of joints for Non-Standard Structures through Additive Manufacturing. The Trefoil and the TriArch projects". Em . eCAADe: Conferences. Lodz, Poland.
- Strauss, H. 2013. "AM Envelope: The Potential of Additive Manufacturing for Facade Constructions". PhD, Delft University of Technology, Faculty of Architecture, Architectural Engineering + Technology department.
- Streich, Bernd. 1991. "Creating Architecture Models by Computer-Aided Prototyping". Em *Computer Aided Architectural Design Futures: Education, Research, Applications [CAAD Futures '91 Conference Proceedings / ISBN 3-528-08821-4] Zürich (Switzerland), July 1991, pp. 535-548*. CUMINCAD.
- Streich, Bernd. 1996. "3D-Scanning and 3D-Printing for Media Experimental Design Work in Architecture". Em *Design Computation: Collaboration, Reasoning, Pedagogy [ACADIA Conference Proceedings / ISBN 1-880250-05-5] Tucson (Arizona / USA) October 31 - November 2, 1996, pp. 183-190*. CUMINCAD.
- Swainson, Wyn Kelly. 1971. Method, medium and apparatus for producing three-dimensional figure product. US 4041476A, acedido a 23 de Julho de 1971. <https://patents.google.com/patent/US4041476A/en>.
- Volkers, J. N. 2010. "The Future of Additive Manufacturing in Facade Design: A Strategic Roadmap towards a Preferable Future".
- Wangler, Timothy, Ena Lloret, Lex Reiter, Norman Hack, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, Mathias Bernhard, et al. 2016. "Digital Concrete: Opportunities and Challenges". *RILEM Technical Letters* 1 (Outubro):
- Wohlers, Terry e Wohlers Associates (Firm). 2005. *Wohlers Report 2005: Rapid Prototyping, Tooling & Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*. River Oak Drive: Wohlers associates.
- Wohlers, Terry T, e Wohlers Associates (Firm). 2014. *Wohlers Report 2014: 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report*.
- Wu, Peng, Jun Wang, e Xiangyu Wang. 2016. "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry". *Automation in Construction* 68 (Agosto): 21–31.

- Yoshida, Tetsuji. 2006. “A Short History Of Construction Robots Research And Development In A Japanese Company”. Em *The 23rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2006*, 188–93. Tokyo, Japan: Waseda University.
- Zerbst, Rainer. 1991. *Gaudí: 1852-1926 Antoni Gaudí i Cornet, una vida dedicada a la arquitectura*. Köln: Taschen.
- Zhang, Jing, e Behrokh Khoshnevis. 2013. “Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting”. *Automation in Construction* 29 (Janeiro): 50–67.

Eletrónica

- Alec. 2016. “Exquisite 400 M2 Villa 3D Printed On-Site in Beijing in Just 45 Days”. 3ders.Org. <http://www.3ders.org/articles/20160614-exquisite-400-m2-villa-3d-printed-on-site-in-beijing-in-just-45-days.html> [5-6-2018];
- Celani, Gabriela, e Affonso Orciuoli. 2008. “A tecnologia desvenda Gaudí - A fabricação digital e o patrimônio histórico: uma visita ao canteiro de obras da Sagrada Família”. Revista aU - Arquitetura e Urbanismo. <http://au.pini.com.br/arquitetura-urbanismo/177/artigo118594-1.aspx> [11-8-2018];
- Collins, Sam. 2011. “3D Printing Sped up Aston Martin LMP1 Design”. *Racecar Engineering*. <http://www.racecar-engineering.com/news/3d-printing-sped-up-aston-martin-lmp1-design/> [29-7-2018];
- Doscher, Marty. 2010. “Modelling in a Digital Dimension”. *Verdict Designbuild*. <https://www.designbuild-network.com/features/feature75564/> [10-1-2018];
- Etherington, Rose. 2011. “The Solar Sinter by Markus Kayser”. Dezeen. <https://www.dezeen.com/2011/06/28/the-solar-sinter-by-markus-kayser/> [6-3-2018];
- Ian, Volner. 2014. “A Completion Date for Sagrada Família, Helped by Technology”. Architect. http://www.architectmagazine.com/technology/a-completion-date-for-sagrada-familia-helped-by-technology_o [15-7-2018];
- ISO/ ASTM. 2015. “ISO/ ASTM 52900: Additive manufacturing”. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en> [5-2-2018];
- Kellner, Tomas. 2017a. “How 3D Printing Could Revolutionize Aerospace Design”. GE Reports. <https://www.ge.com/reports/3d-printed-bionic-parts-revolutionize-aerospace-design/> [3-9-2018];
- Kellner, Tomas. 2017b. “How 3D Printing Is Changing Aerospace Manufacturing”. GE Reports. <https://www.ge.com/reports/mind-meld-ge-3d-printing-visionary-joined-forces/> [3-9-2018];
- Kira. 2015. “Exclusive: WinSun China builds world’s first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building”. 3ders.org. <https://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html> [5-6-2018];
- Koslow, Tyler. 2018. “Federal Judge Blocks Release of 3D Gun Models, But Defense Distributed Defies Court Ruling”. All3DP. <https://all3dp.com/4/federal-judge-blocks->

- release-of-3d-printable-gun-models/ [2-9-2018];
- Louro, Manuel. 2018. “Como a impressão de armas 3D se tornou uma guerra sem fim nos EUA”. PÚBLICO <https://www.publico.pt/2018/08/01/mundo/noticia/como-a-impressao-de-armas-3d-nos-eua-se-tornou-uma-guerra-sem-fim-1839824> [2-9-2018];
 - Nathan, Stuart. 2015. “Aerospace Takes to Additive Manufacturing”. *The Engineer*. <https://www.theengineer.co.uk/aerospace-takes-to-additive-manufacturing/> [3-9-2018];
 - Niehe, Pien. 2017. “Sand Printing Makes Complex Casted Structural Parts Affordable - Arup”. Arup. <http://www.arup.com/news-and-events/news/sand-printing-makes-complex-casted-structural-parts-affordable> [23-5-2018];
 - Novitski, B.J. 1999. “Scale Models from Thin Air”. Architecture Week. 1999. http://www.architectureweek.com/2000/0802/tools_1-2.html [25-2-2018];
 - Vries, Caspar de. 2017. “Volkswagen Autoeuropa: Maximizing production efficiency with 3D printed tools, jigs, and fixtures”. Ultimaker. 2017. <https://ultimaker.com/en/stories/43969-volkswagen-autoeuropa-maximizing-production-efficiency-with-3d-printed-tools-jigs-and-fixtures> [22-8-2018];
 - Wyman, Carrie. 2015a. “Opel Cuts Assembly Tool Production Costs Up to 90% with 3D Printing”. Stratasys Blog. 2015a. <http://blog.stratasys.com/2015/11/18/opel-3d-printing/> [22-8-2018];
 - “3D Concrete Printing”. sem data. Sika. https://www.sika.com/content/corp/annualreport/en/index_2017/topics/3d-concrete-printing.html [3-08-2018];
 - “3D Printed Bridge”. sem data. *Institute for Advanced Architecture of Catalonia*. <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/3d-printed-bridge/> [3-8-2018];
 - “3D Printed Office”. sem data. Dubai Future Foundation. <http://www.officeofthefuture.ae/> [16-8-2018];
 - “3D Printing “builds” Sagrada Familia”. 2015. BBC News. 2015. <https://www.bbc.co.uk/news/av/technology-31923259/3d-printing-helps-build-the-sagrada-familia>
 - “3D Printing for Audiology”. sem data. Formlabs. <https://formlabs.com/industries/audiology/> [26-1-2018];
 - “3D printing technology for improved hearing”. sem data. Sonova. <https://www.sonova.com/en/features/3d-printing-technology-improved-hearing> [26-1-2018];
 - “Adidas Futurecraft”. sem data. Adidas. <https://www.adidas.com/us/futurecraft> [5-2-2018];
 - “Apis Cor”. sem data. Apis Cor. <http://apis-cor.com/en/>.
 - “BetAbram”. sem data. BetAbram. <http://betabram.com/> [3-8-2018];
 - “Brake Caliper from 3-D Printer”. sem data. Bugatti. <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/> [6-8-2018];
 - “Branch Technology”. sem data. Branch Technology. <https://www.branch.technology/> [25-8-2018];
 - “Color Jet 3D Printing (CJP) Helps Architects at Sagrada Familia Follow Gaudi’s Method While Saving Time and Money”. sem data. 3D Systems. <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/sagrada-familia-color-jet->

- printing-cjp-helps-architects-sagrada-familia [3-6-2018];
- “Computational Architecture”. sem data. Michael Hansmeyer - Computational Architecture. <http://www.michael-hansmeyer.com/index.html> [7-5-2018];
 - “Crossrail in Numbers”. sem data. Crossrail. <http://www.crossrail.co.uk/news/crossrail-in-numbers> [3-5-2018];
 - “CyBe Construction”. sem data. CyBe. <https://cybe.eu/> [26-7-2018];
 - “Digital Grotesque”. sem data. Digital Grotesque. <https://digital-grotesque.com/> [7-5-2018];
 - “Emerging Objects”. sem data. Emerging Objects. <http://www.emergingobjects.com/> [2-2-2018];
 - “Enabling The Future”. sem data. Enabling The Future. <http://enablingthefuture.org/> [18-09-2018];
 - “Freedom of Creation”. sem data. Freedom of Creation. <http://www.freedomofcreation.co.uk/> [24-1-2018];
 - “FreeFAB”. sem data. FreeFAB. <http://www.freefab.com/> [3-05-2018];
 - “Future Factories”. sem data. Future Factories. Acedido 1 de Fevereiro de 2018. <http://www.futurefactories.com/>.
 - Goehrke, Sarah Anderson. 2017. “Chinese Team Develops Low-Cost, Highly Accurate Method for 3D Printing Patient-Specific”. 3DPrint.com. 2017. <https://3dprint.com/198498/hebei-low-cost-liver-models/> [29-3-2018];
 - “Guggenheim Museum”. sem data. Zaha Hadid Architects. <http://www.zaha-hadid.com/architecture/guggenheim-museum/> [30-8-2018];
 - “Biography” sem data. Janne Kytanen. <https://www.jannekyttanen.com/biography/>. [24-1-2018];
 - “Jiri Evenhuis”. sem data. Jiri Evenhuis. <http://jiri.nl/temp/> [27-4-2018];
 - “Local Motors”. 2018. Local Motors. <https://localmotors.com/> [23-1-2018];
 - “Minibuilders by IAAC”. sem data. Minibuilders. <http://robots.iaac.net/> [24-6-2018];
 - “Morphopedia: Cahill Center for Astronomy and Astrophysics at Caltech”. sem data. Morphosis. <https://www.morphosis.com/search/9/?s=Cahill&m=project> [4-9-2018];
 - “MX3D - Projects”. sem data. MX3D. <http://mx3d.com/1689-2-2/> [25-6-2018];
 - “NASA N+3 Model”. sem data. Stratasys. Acedido 14 de Fevereiro de 2018. <https://www.stratasysdirect.com/resources/case-studies/fdm-nasa-n3-model-aurora-flight-sciences> [26-1-2018];
 - “OMV H2 House”. sem data. GREG LYNN FORM. <http://glform.com/buildings/h2-house/> [16-7-2018];
 - “On Site Robotics”. sem data. *The Institute for Advanced Architecture of Catalonia*. <https://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/on-site-robotics/> [24-6-2018];
 - “One_Shot”. sem data. Patrick Jouin. <http://www.patrickjouin.com/en/projects/patrick-jouin-id/1326-oneshot.html> [6-2-2018];
 - “Project AMIE”. sem data. Oak Ridge National Laboratory. <https://web.ornl.gov/sci/eere/amie/> [3-8-2018];
 - “Project EGG”. 2013. *Project EGG*. <http://projectegg.org/project-egg/> [16-9-2018];

- “Prusa i3 3D printers”. sem data. Prusa Research. <https://shop.prusa3d.com/en/> [2-5-2018];
- “RepRap”. sem data. RepRapWiki. http://reprap.org/wiki/Main_Page. [2-5-2018];
- “Rudenko 3D Printer”. sem data. Total Kustom. <http://www.totalkustom.com/> [26-6-2018];
- “Sculpteo, Online 3D Printing Service for your 3D design”. sem data. Sculpteo. <https://www.sculpteo.com/en/> [18-9-2018];
- “Selective Laser Sintering, Birth of an Industry - Department of Mechanical Engineering”. 2012. The Cockrell School of Engineering at The University of Texas. <http://www.me.utexas.edu/news/news/selective-laser-sintering-birth-of-an-industry> [5-6-2018];
- “Shapeways - Create Your Product. Build Your Business”. sem data. Shapeways. <https://www.shapeways.com/> [2-4-2018];
- “Sketch Furniture”. sem data. Front. Acedido 25 de Janeiro de 2018. <http://www.frontdesign.se/sketch-furniture-performance-design-project> [25-1-2018];
- “SLO Printed Lens Camera”. sem data. Pinshape. <https://pinshape.com/items/25871-3d-printed-slo-printed-lens-camera> [25-1-2018];
- “Smith|Allen”. sem data. Smith|Allen. <https://cargocollective.com/SmithAllen/> [2-8-2018];
- “The Planter Brick”. sem data. *Rael Sanfratello*. <http://www.rael-sanfratello.com/?p=60> [12-1-2018];
- Thingiverse.com. sem data. “Thingiverse - Digital Designs for Physical Objects”. Thingiverse. <https://www.thingiverse.com/> [18-9-2018];
- Volner, Ian. 2014. “End in Sight”. Scott Henson Architect. 2014. <http://www.hensonarchitect.com/end-in-sight> [5-6-2018];
- “XtreeE”. sem data. XtreeE. <http://www.xtreee.eu/> [3-8-2018];
- “Zaha Hadid - Accurate Architectural Model”. sem data. 3T RPD. <https://www.3trpd.co.uk/portfolio/zaha-hadid-accurate-architectural-model/> [30-8-2018].

Lista de Figuras

Capítulo 2

- Figura 2.1* Kolarevic 2003 (esquerda);
<http://www.notcot.com/archives/2012/09/supermanoeuvre-robot-wire-bending.php> (direita);
- Figura 2.2* Imagem do autor;
- Figura 2.3* Imagem adaptada, De Witte 2015;
- Figura 2.4* Imagem da autoria do DFL (esquerda);
<https://additivenews.com/industrial-3d-printing-prototyping-production/> (direita);
- Figura 2.5* Imagem do autor;
- Figura 2.6* Imagem do autor;
- Figura 2.7* Imagem do autor;
- Figura 2.8* Imagem do autor;
- Figura 2.9* https://en.wikipedia.org/wiki/Photo_sculpture (esquerda);
<https://frenchsculpture.org/en/sculpture/4264-unfinished-photosculpture-portrait-head-of-a-woman> (direita);
- Figura 2.10* Bourell et al. 2009
- Figura 2.11* Gibson et al. 2015 (em cima);
<https://www.3dsystems.com/our-story> (em baixo);
- Figura 2.12* Jones et al. 2011;
- Figura 2.13* Imagem do autor;
- Figura 2.14* Imagem adaptada, Redwood et al. 2017;
- Figura 2.15* <https://formlabs.com/>;
- Figura 2.16* imagem adaptada, Redwood et al. 2017;
- Figura 2.17* <http://www.renishaw.com> (esquerda);
<https://nanosteelco.com/> (direita);
- Figura 2.18* Imagem adaptada, Redwood et al. 2017;
- Figura 2.19* <https://www.exone.com/Resources/Technology-Overview/What-is-Binder-Jetting> (esquerda);
<https://www.voxeljet.com/industries/foundries/3d-printing-saves-up-to-75-in-sand-casting-costs/> (direita);

Figura 2.20 Imagem adaptada, Redwood et al. 2017;

Figura 2.21 Imagem adaptada, Redwood et al. 2017;

Figura 2.22 <https://step3d.co.uk/> (esquerda);
Malé Alemany 2016 (direita);

Figura 2.23 Alves et al. 2001;

Figura 2.24 <https://www.optomec.com/>

Figura 2.25 Goekre 2017 (em cima);
<https://picryl.com/media/mit-n3-d8-111-scale-model-in-the-14x22-foot-subsonic-tunnel-f503a9> (em baixo);

Figura 2.26 Mayer 2009;

Figura 2.27 de Vries 2017;

Figura 2.28 <https://www.dezeen.com/2016/10/04/video-interview-janne-kyttanen-lily-light-3d-printing-movie/> (em cima);
<https://www.dtu.dk/english/news/2017/05/self-driving-bus-olli-tested-on-lyngby-campus?id=42bf02e8-3b89-461f-ab19-a10beb1ac6be> (em baixo);

Figura 2.29 <https://pinshape.com/items/25871-3d-printed-slo-printed-lens-camera> (em cima, esquerda);
Koslow 2018 (em cima, direita);
<http://enablingthefuture.org/category/featured-stories/> (em baixo);

Figura 2.30 <http://frontdesign.se/sketch-furniture-performance-design-project>;

Figura 2.31 <http://www.voxelworld.info/tuber9.html> (em cima);
<https://n-e-r-v-o-u-s.com/cellCycle/?t=0> (em baixo, esquerda);
<https://n-e-r-v-o-u-s.com/shop/product.php?code=102> (em baixo, direita);

Figura 2.32 <https://formlabs.com/industries/audiology/> (em cima);
<https://www.sonova.com/en/features/3d-printing-technology-improved-hearing> (em baixo);

Figura 2.33 Kellner 2017a (em cima);
<https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/> (em baixo);

Figura 2.34 <http://www.patrickjouin.com/en/projects/patrick-jouin-id/1326-oneshot.html> (em cima);
<https://www.flickr.com/photos/91507998@N06/8399118701/> (em baixo, esquerda);
Kellner 2017b (em baixo, direita);

Figura 2.35 Klein et al. 2015 (esquerda);
Etherington 2011 (direita);

Figura 2.36 <http://www.materialecology.com/projects/details/beast> (em cima);
<https://www.fabbaloo.com/blog/2017/4/13/adidas-partners-with-carbon-to-launch-first-mass-production-3d-printed-shoe> (em baixo);

Figura 2.37 Daly et al. 2016 (esquerda);
Murphy e Atala 2014 (direita);

Capítulo 3

- Figura 3.1* Deplazes 2008 (em cima);
https://www.rtp.pt/noticias/economia/russos-e-chineses-na-corrida-aos-estaleiros-de-viana-do-castelo_n537478 (em baixo);
- Figura 3.2* Deplazes 2008 (esquerda);
<https://www.volkswagenautoeuropa.pt/comunicacao/relacoes-publicas/media-kit/imagens/fabrica-area-da-montagem-final> (direita);
- Figura 3.3* Kolarevic 2003;
- Figura 3.4* Streich 1991;
- Figura 3.5* Duarte 2001;
- Figura 3.6* Sass s.d.;
- Figura 3.7* Rotheroe 2002;
- Figura 3.8* <http://glform.com/buildings/h2-house>;
- Figura 3.9* <https://www.morphosis.com/search/9/?s=Cahill&m=project>;
- Figura 3.10* Peters e Kestelie 2008;
- Figura 3.11* Whitehead et al. 2011;
- Figura 3.12* Peters e Kestelie 2008 (em cima);
<https://www.easyvoyage.co.uk/travel-deal/around-the-world-with-norman-foster/chesa-futura-st-moritz-switzerland> (em baixo);
- Figura 3.13* Bock e Linner 2016 (esquerda);
Bock e Langenberg (direita);
- Figura 3.14* <https://www.bmwgroup.com/en/company/history.html> (esquerda);
Sousa 2010 (direita);
- Figura 3.15* Yoshida 2006;
- Figura 3.16* Khoshnevis 2004 (esquerda);
Khoshnevis et al. 2006 (direita);
- Figura 3.17* <http://www.buildfreeform.com/>;
- Figura 3.18* http://www.aditoscana.it/news/contributi_det.asp?menu=5&id=156 (esquerda);
<https://marcoferreri.wordpress.com/2011/04/04/unacasatuttadiunpezzo-a-faraneto/> (direita);
- Figura 3.19* <http://www.rael-sanfratello.com/?p=60> (esquerda);
Sabin 2010 (centro);
Strauss 2013 (direita);
- Figura 3.20* <https://cargocollective.com/SmithAllen>

Figura 3.21 <https://www.voxeljet.com/branchen/cases/betonguss-mit-sandformen/> (em cima);
<https://www.flickr.com/photos/oakridgelab/sets/72157658718524166/> (em baixo);

Figura 3.22 <https://cybe.eu/portfolio-item/3dhousing05/> (esquerda);
<http://apis-cor.com/en/about/news/first-house> (direita);
<http://www.xtreee.eu/> (centro);

Figura 3.23 Keating et al. 2017 (primeira linha);
<http://robots.iaac.net/> (segunda linha);
<http://mx3d.com> (terceira linha);
<https://www.branch.technology/projects-1/2017/6/9/shop> (quarta linha);

Figura 3.24 Malé Alemany 2016;

Figura 3.25 Aejmelaesus-Lindström et al. 2017 (em cima, esquerda);
Wangler et al. 2016 (em cima, direita);
Dörfler et al. 2014 (em baixo);

Capítulo 4

Figura 4.1 Imagem do autor;

Figura 4.2 Burry et al. 2001;

Figura 4.3 <https://www.tctmagazine.com/prsnlz/a-3doodled-sagrada-familia/> (em cima);
<https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/sagrada-familia-color-jet-printing-cjp-helps-architects-sagrada-familia> (em baixo);

Figura 4.4 Burry 2002 (em cima);
Burry et al. 2001 (em baixo);

Figura 4.5 <https://www.tctmagazine.com/prsnlz/a-3doodled-sagrada-familia/> (em cima);
Ian 2014 (em baixo);

Figura 4.6 Shumacher 2004;

Figura 4.7 <http://www.zaha-hadid.com/architecture/guggenheim-museum/>;

Figura 4.8 Shumacher 2004;

Figura 4.9 Imagem do autor;

Figura 4.10 https://www.archdaily.com/787256/crossrail-unveils-new-station-designs-for-londons-elizabeth-line?ad_medium=gallery;

Figura 4.11 <http://www.freefab.com/>

Figura 4.12 <https://www.ianvisits.co.uk/blog/2017/09/28/how-crossrail-is-using-3d-printing-in-its-stations/>;

Figura 4.13 <https://www.ianvisits.co.uk/blog/2017/09/28/how-crossrail-is-using-3d-printing-in-its-stations/>

Figura 4.14 Sarakinioti et al. 2017 (esquerda);
<http://www.3ders.org/articles/20170817-3d-printed-facade-system-spong3d-could-hugely-improve-thermal-performance-of-offices-and-homes> (direita);

- Figura 4.15* Sarakinioti et al. 2017 (em cima);
<https://pop-in-expo.hetnieuweinstituut.nl/en/activities/spong3d> (em baixo);
- Figura 4.16* Galjaard et al. 2015;
- Figura 4.17* Ren e Galjaard 2015;
- Figura 4.18* <http://www.materialsforarchitecture.co.uk/news/3d-printing-shows-its-metal/>;
- Figura 4.19* <https://www.archdaily.com/880432/arup-develops-affordable-3d-printing-sand-casts-for-complex-steel-structural-elements>;
- Figura 4.20* López et al. 2014;
- Figura 4.21* Rippmann et al. 2018;
- Figura 4.22* Block et al. 2017 (em cima);
Rippmann et al. 2018 (em baixo);
- Figura 4.23* Hack et al. 2014a;
- Figura 4.24* Hack et al. 2014a;
- Figura 4.25* <https://inhabitat.com/12000-square-foot-3d-printed-mansion-pops-up-in-china/winsun-3dprint-mansion4/>;
- Figura 4.26* Davison 2015;
- Figura 4.27* Davison 2015;
- Figura 4.28* Kira 2015;
- Figura 4.29* <http://3dprintcanalhouse.com/> (esquerda);
<http://houseofdus.com/#project-kamermaker> (direita);
- Figura 4.30* <http://houseofdus.com/#project-3d-print-canal-house>;
- Figura 4.31* <http://3dprintcanalhouse.com/>;
- Figura 4.32* <http://houseofdus.com/#project-urban-cabin>;
- Figura 4.33* <http://houseofdus.com/#project-urban-cabin>;
- Figura 4.34* <http://houseofdus.com/#project-europe-building>;
- Figura 4.35* Imagem do autor;
- Figura 4.36* <http://www.emergingobjects.com/project/saltygloo/>;
- Figura 4.37* <http://www.emergingobjects.com/project/saltygloo/>;
- Figura 4.38* <http://www.emergingobjects.com/project/cool-brick/> (esquerda);
<http://www.emergingobjects.com/project/seed-stitch/> (direita);
- Figura 4.39* <http://www.emergingobjects.com/project/rubber-pouff/>;
- Figura 4.40* <http://www.emergingobjects.com/project/poroso/>;
- Figura 4.41* <http://www.emergingobjects.com/project/bloom-2/>;
- Figura 4.42* <http://www.emergingobjects.com/project/cabin-of-3d-printed-curiosities/>;
- Figura 4.43* Oxman et al. 2011;
- Figura 4.44* Oxman et al. 2011 (em cima);
<http://matter.media.mit.edu/tools/details/3d-printing-of-functionally-graded-materials> (em baixo);
- Figura 4.45* Hansmeyer e Dillenburger 2014 (em cima);
<http://www.michael-hansmeyer.com/digital-grotesque-I> (em baixo);

Figura 4.46 <https://inhabitat.com/jaw-dropping-3d-printed-grotto-explores-the-future-of-architecture/digital-grotesque-ii-by-michael-hansmeyer-and-benjamin-dillenburger-13/>;

Figura 4.47 <http://www.michael-hansmeyer.com/digital-grotesque-II>

Figura 4.48 Imagem do autor;

Figura 4.49 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.50 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.51 Imagem do autor;

Figura 4.52 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.53 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.54 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.55 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.56 Imagem da autoria do DFL;

Figura 4.57 Imagem da autoria do DFL;

