



M 2016

**U. PORTO**  
**FEUP** FACULDADE DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE DO PORTO

# EXPLORAÇÃO DAS POSSIBILIDADES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO

**GONÇALO TEIXEIRA FERREIRA LOPES**  
DISSERTAÇÃO DE Mestrado APRESENTADA  
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM  
ÁREA CIENTÍFICA

## **MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2015/2016**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ [miec@fe.up.pt](mailto:miec@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2015/2016 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

## **AGRADECIMENTOS**

Esta dissertação representa não apenas a fase final do curso que frequento, mas de um percurso escolar de quase 18 anos. Desta forma, tenho necessariamente de agradecer à minha família, e em particular aos meus pais, por todas as oportunidades proporcionadas, mas também pelas exigências, incentivos e tolerância demonstrados ao longo de toda esta trajetória.

Quero agradecer aos meus amigos, em particular àqueles que tive o privilégio de conhecer durante este percurso acadêmico, pelo companheirismo continuamente manifestado.

Por fim, tenho também de agradecer ao Professor Doutor Alfredo Soeiro pela disponibilidade imediata demonstrada no momento em que sugeri o tema para esta dissertação, bem como ao longo de todo o seu desenvolvimento.



## **RESUMO**

A impressão 3D representa um processo de fabrico aditivo, que consiste na criação de um modelo tridimensional digital, que será posteriormente executado por uma máquina controlada por computador, normalmente através da deposição de camadas de um determinado material, que se vão sobrepondo até obter fisicamente o modelo concebido.

Esta tecnologia tem vindo a ser desenvolvida desde os anos 80, inicialmente no âmbito da Prototipagem Rápida, com o objetivo de realizar de forma rápida e económica modelos conceptuais para o desenvolvimento de produtos, mas mais tarde, com a sua evolução, o campo de aplicações foi-se diversificando. Devido às suas potencialidades, este processo tecnológico também acabou por gerar interesse na área da construção, provindo daí várias iniciativas de investigação por parte de diversas entidades.

A presente dissertação pretende expor os principais desenvolvimentos da Impressão 3D promovidos no setor da construção, até à data, e refletir sobre os impactos que a sua incorporação poderá acarretar para este. Esta análise será feita, em parte, segundo a perspetiva de um Diretor de Obra, uma vez que este profissional agremia em si a coordenação das principais áreas de intervenção constituintes do processo construtivo, permitindo assim obter uma visão geral das imposições resultantes da implementação da tecnologia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Impressão 3D, Fabricação Aditiva, Construção, Diretor de Obra



## **ABSTRACT**

3D Printing represents an additive manufacturing process, that is based on the creation of a tridimensional digital model, which should be completed by a computer controlled machine, usually by adding layers of a material, that are overlapped until the physical creation of the model.

This technology has been developed since the 80's, firstly in the field of Rapid Prototyping, which allowed the fast and economic development of conceptual models for product development. Later with its growth, the application field became larger. This technological process, and the potentials implied also generated interest in the construction area, emerging since then multiple exploration efforts, promoted by several entities.

This dissertation intends to expose the main developments associated with 3D Printing, accomplished by the construction sector, so far, as well as to reflect about the impacts that could be generated from its incorporation. This analysis will be made, partially, according to the perspective of a Construction Manager, since this job implies the coordination of the key areas of intervention that constitutes the construction process, allowing an overview of the impositions resulting from the implementation of this technology.

**KEYWORDS:** 3D Printing, Additive Manufacturing, Construction, Construction Manager





## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	I
RESUMO .....	III
ABSTRACT .....	V
ÍNDICE .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS .....	XII
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura.....	4
<b>2. INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D .....</b>	<b>7</b>
2.1. DEFINIÇÃO .....	7
2.2. PROCESSOS.....	9
2.3. ÁREAS DE APLICAÇÃO.....	12
2.4. IMPRESSÃO 3D APLICADA À CONSTRUÇÃO.....	16
<b>3. IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO: CASOS DE ESTUDO .....</b>	<b>17</b>
3.1 ENQUADRAMENTO .....	17
3.2 CASOS DE ESTUDO.....	18
3.2.1 MODELOS ARQUITETÓNICOS .....	18
3.2.2 EMERGING OBJECTS.....	21
3.2.3 ARUP.....	23
3.2.4 BRANCH TECHNOLOGY.....	24
3.2.5 IAAC – PYLOS E MINI-BUILDERS .....	27
3.2.6 DUS ARCHITECTS – 3D PRINTED CANAL HOUSE.....	32
3.2.7 WASP .....	35
3.2.8 APIS COR .....	36
3.2.9 MX3D.....	38
3.2.10 D-SHAPE.....	40
3.2.11 WINSUN .....	44

3.2.12 CONTOUR CRAFTING.....	46
<b>3.3 ANÁLISE.....</b>	<b>50</b>
3.3.1 DÚVIDAS.....	50
3.3.2 APRECIÇÃO GERAL .....	51
3.3.3 VANTAGENS.....	53
3.3.3.1 EFETIVAS.....	53
3.3.3.2 POTENCIAIS .....	54
3.3.4 DESVANTAGENS.....	54
<b>4. IMPLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO: PERSPETIVA DO DIRETOR DE OBRA.....</b>	<b>57</b>
<b>4.1 ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 FUNÇÕES DO DIRETOR DE OBRA .....</b>	<b>59</b>
4.2.1 PLANEAMENTO.....	59
4.2.2 CONTROLO DE CUSTOS .....	59
4.2.3 MATERIAIS .....	60
4.2.4 MÃO DE OBRA.....	60
4.2.5 SUBEMPREGADA .....	60
4.2.6 EQUIPAMENTOS .....	61
4.2.7 QUALIDADE .....	62
4.2.8 AMBIENTE .....	62
<b>5. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>63</b>
<b>5.1 ENQUADRAMENTO .....</b>	<b>63</b>
<b>5.2 DESAFIOS FUTUROS .....</b>	<b>63</b>
<b>5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>65</b>
<b>5.4 CONSTRUÇÃO LUNAR POR IMPRESSÃO 3D.....</b>	<b>66</b>
5.4.1 FOSTER+PARTNERS + D-SHAPE + ESA.....	66
5.4.2 NASA + CONTOUR CRAFTING .....	67
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>72</b>
<b>BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR .....</b>	<b>78</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo da complexidade que as estruturas auxiliares podem assumir, Museu do Amanhã, Rio de Janeiro [2] .....	1
Figura 2 – Cadeia de provisão do edifício [5] .....	2
Figura 3 – Cidade do México: 9 milhões de habitantes; Área metropolitana: 21 milhões de habitantes [11] .....	3
Figura 4 – Favela em Caracas, capital da Venezuela [12] .....	3
Figura 5 – Primeiro objeto tridimensionalmente impresso: peça para um aparelho optométrico [18] ...	7
Figura 6 – Representação esquemática das diferenças entre os processos de fabricação subtrativa e aditiva [21] .....	8
Figura 7 – Representação esquemática do processo de impressão 3D [23] .....	9
Figura 8 – Estereolitografia: esquema de funcionamento [26] .....	9
Figura 9 – Modelação por Deposição de Material Fundido: esquema de funcionamento [26] .....	10
Figura 10 – Sinterização Seletiva por Laser: esquema de funcionamento [26] .....	10
Figura 11 – Projeção de Aglutinante: esquema de funcionamento [26] .....	11
Figura 12 – Fabricação de Objetos Laminados: esquema de funcionamento [26] .....	11
Figura 13 – Principais áreas de aplicação da Impressão 3D e atributos preferenciais, estudo desenvolvido pela Deloitte [27] .....	12
Figura 14 – Peças normais vs peças com design otimizado impressas tridimensionalmente [29], [30]	13
Figura 15 – Peças complexas impressas tridimensionalmente [31] .....	13
Figura 16 – Exemplo de possíveis implantes – perna e dente – gerados por impressão 3D [32], [33].	14
Figura 17 – Escultura concebida digitalmente e impressa a três dimensões [34] .....	15
Figura 18 – Vestido e sapatos tridimensionalmente impressos [35], [36] .....	15
Figura 19 – Sequência: Design digital tridimensional; Modelo Físico Tridimensional gerado por Impressão 3D; Obra após Conclusão [41], [38], [42] .....	19
Figura 20 – Sequência: Design CAD; Modelo Físico Tridimensional gerado por Impressão 3D; Obra no decorrer do processo de execução [43], [39], [44] .....	20
Figura 21 – a) Zcorp Z450 [45], b) Spectrum Z510 [46] .....	20
Figura 22 – Arrefecimento por Evaporação numa parede constituída por Cool Bricks [48] .....	21
Figura 23 – Detalhe de um elemento composto por vários tijolos [48] .....	22
Figura 24 – Quake Column com alguns detalhes em evidência [49] .....	22
Figura 25 – Perspetivas do Saltygloo, construído à base de sal [50] .....	23
Figura 26 – Nós metálicos [52] .....	24
Figura 27 – Braço robótico KUKA assente em carril [56] .....	25
Figura 28 – Produção de uma armadura experimental [56] .....	25
Figura 29 – Estrutura da parede segundo o conceito da empresa [57] .....	26
Figura 30 – Troço de parede experimental [55] .....	26
Figura 31 - Exemplo da resistência estrutural de um modelo de pequena escala da parede [58] .....	27
Figura 32 – Elementos produzidos à base do material desenvolvido no projeto Pylos [61] .....	28
Figura 33 – Robô Base e respetivas dimensões (mm) [63] .....	29
Figura 34 – Demonstração da função desempenhada pelo Robô Base [63] .....	29
Figura 35 – Robô Grip e respetivas dimensões (mm) [63] .....	30
Figura 36 – Demonstração da função desempenhada pelo Robô Grip [63] .....	30
Figura 37 – Robô Vácuo e respetivas dimensões (mm) [63] .....	31
Figura 38 – Demonstração da função desempenhada pelo Robô Vácuo [63] .....	31
Figura 39 – Sequência dos três robôs a operar, em ensaio experimental [63] .....	32

Figura 40 – Kamermaker [66] .....	33
Figura 41 – Interior da Kamermaker, com uma peça experimental a ser desenvolvida [67] .....	33
Figura 42 – Constituição do edifício [68].....	34
Figura 43 – a) Troço de parede [70], b) Troço de parede já preenchido por eco betão [69] .....	35
Figura 44 – Big Delta e pormenor da cabeça de extrusão [73], [74] .....	36
Figura 45 – Elemento experimental produzido à base de argila [75] .....	36
Figura 46 – Apis Cor [77] .....	37
Figura 47 – Apis Cor: transporte acessível [78] .....	37
Figura 48 – Processo de construção [79].....	38
Figura 49 – Troço de parede teste, com janela integrada [80].....	38
Figura 50 – Modelo de um braço robótico de 6 eixos [83]. .....	39
Figura 51 – Braço robótico e detalhe do processo de fabrico [84] .....	39
Figura 52 – Modelo digital da ponte que se pretende executar [84] .....	40
Figura 53 – Idealização da D-Shape [85] .....	40
Figura 54 – D-Shape em ambiente laboratorial [87], [88].....	42
Figura 55 – Detalhe da cabeça de impressão e múltiplas bocas [89] .....	42
Figura 56 – Radiolaria: estrutura executada pela D-Shape, que ilustra a liberdade de forma alcançável [90] .....	43
Figura 57 – Recife artificial: a) modelo virtual 3D [92] e b) já materializado [93] .....	43
Figura 58 – Impressora 3D desenvolvida pela Winsun [95] .....	44
Figura 59 – a) Reforço com padrão diagonal [98], b) Reforço com armadura metálica [99] .....	45
Figura 60 – Sequência de montagem até à obção de uma das dez casas construídas pela empresa em 24h [96] .....	45
Figura 61 – Exemplo de revestimento com painéis [97] .....	46
Figura 62 – Representação da boca de extrusão [101], [102].....	47
Figura 63 – Esquematização do sistema grua-pórtico [103] .....	47
Figura 64 – Elementos experimentais produzidos por CC [101], [104].....	48
Figura 65 – Exemplificação da inserção automática de segmentos de armadura [100] .....	48
Figura 66 – Reforço automático de FRP [105].....	48
Figura 67 – Exemplificação de revestimento automático [100].....	49
Figura 68 – Exemplificação da instalação automática da rede hidráulica [100] .....	49
Figura 69 – Exemplificação da instalação da rede elétrica [100] .....	50
Figura 70 – Modelo digital do projeto previsto [109] .....	65
Figura 71 – Bloco experimental de rocha basáltica [110] .....	66
Figura 72 – Protótipo teste do ATHLETE [113].....	66
Figura 73 – Representação do ATHLETE, a executar uma parede [112] .....	67
Figura 74 – Representação de elementos formados por painéis modulares pré-fabricados [112].....	67
Figura 75 – Modelo teste do rover Chariot, com pá incorporada [114] .....	67
Figura 76 – Representação de construção lunar [115].....	68

## ABREVIATURAS E ACRÓNIMOS

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

AM – Additive Manufacturing – Fabricação Aditiva

.amf – Additive manufacturing format

ATHLETE – All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer

BIM – Building Information Modeling

BJ – Binder Jetting – Projeção de Aglutinante

CAD – Computer Aided Design – Design Assistido por Computador

C-fab – Cellular Fabrication – Fabricação Celular

CNC – Computer Numeric Control – Controlo Numérico Computadorizado

CC – Contour Crafting

DO – Diretor de Obra

ESA – European Space Agency

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

FDM – Fused Deposition Modeling – Modelação por Deposição de Material Fundido

FFF – Fused Filament Fabrication – Fabricação por Fusão de Filamentos

FRP – Fiber Reinforced Plastics

GIS – Geographic Information System – Sistema de Informação Geográfica

IAAC – Instituto para Arquitetura Avançada da Catalunha

LOM – Laminated Object Manufacturing – Fabricação de Objetos Manufaturados

MS-FACS – Microwave Sinterator Freeform Additive Construction

NASA – National Aeronautics and Space Administration

ONU – Organização das Nações Unidas

PME's – Pequenas e Médias Empresas

RP – Rapid Prototyping – Prototipagem Rápida

SLA – Stereolithography – Estereolitografia

SLM – Selective Laser Melting – Fusão Seletiva por Laser

SLS – Selective Laser Sintering – Sinterização Seletiva por Laser

.stl – Stereolithography

USC – University of Southern California

UV – Ultravioleta

WASP – World’s Advanced Saving Program

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Enquadramento

Os modernos programas CAD permitem com relativa facilidade a conceção de projetos complexos. A indústria da construção, no entanto, não conseguiu acompanhar esta evolução, o que acaba por impedir a amplificação e materialização de todas as potencialidades deste software de design [1]. Desde o século XIX, usa-se cimento Portland para formar betão, que será moldado com recurso a cofragens, onde por sua vez poderão ser instaladas armaduras de aço tendo em vista o aumento da resistência à tração deste material. A execução de projetos com design e estrutura complexos – por exemplo uma superfície convexo-côncava – requer a pré-fabricação de cofragens e armaduras apropriadas – que são caras – e a montagem de andaimes de apoio, sendo que muitos destes elementos não são depois reutilizáveis [1]. A conclusão dos trabalhos é feita de forma manual, porque apesar da maquinaria existente – guias, betoneiras, sistemas de bombagem – a indústria está assente no trabalho manual e no seu controle sob estas [1]. Esta falta de automação conduz a baixos níveis de produtividade e eficiência, bem como a uma qualidade inferior do produto final.

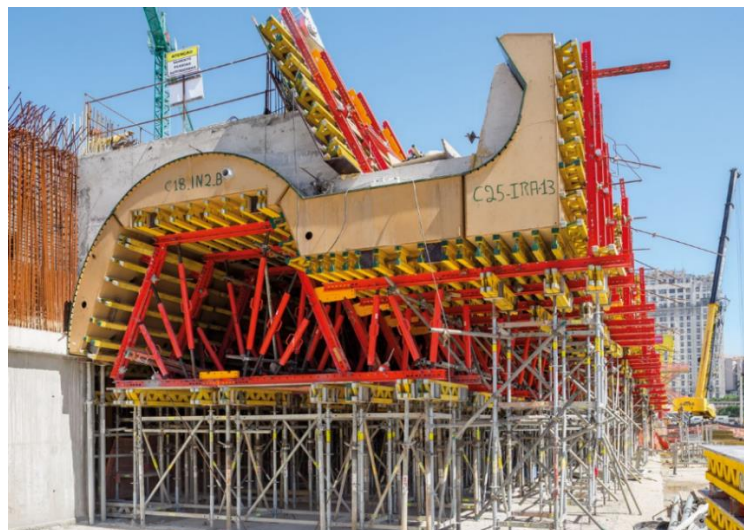


Figura 1 – Exemplo da complexidade que as estruturas auxiliares podem assumir, Museu do Amanhã, Rio de Janeiro [2]

A indústria da construção também se destaca, de forma negativa, pela produção de elevados níveis de desperdício e poluição. Segundo um estudo promovido pelo governo australiano, os materiais de construção constituem cerca de metade de todos os materiais usados e cerca de metade dos resíduos sólidos gerados, mundialmente. Têm um impacto ambiental em cada passo do processo de construção – extração dos materiais brutos, processamento, fabricação, transporte, construção, demolição [3]. Para além disso durante este processo a indústria é responsável – a nível europeu – por 40% de toda a energia consumida, o que corresponde a 1/3 das emissões totais de CO<sub>2</sub>, no mesmo continente [4].



Figura 2 – Cadeia de provisão do edifício [5]

A somar a estas dificuldades, recaem também sobre o setor, de forma indireta, exigências de cariz sociopolítico e humanitário, todas com perspectiva de agravamento a curto/médio prazo, o que torna premente a aplicação de medidas de resolução eficazes. O crescimento populacional – segundo estimativas da ONU em 2050 a população mundial será de 9,5 mil milhões (atualmente é de 7 mil milhões) – com 90% deste crescimento a ocorrer em África e na Ásia. A tendência de aglomeração destas massas em cidades, o que implicará uma rápida urbanização e uma predisposição para a formação de megacidades (mais de 10 milhões de habitantes). A ONU prevê que em 2050, 2/3 da população mundial viva em cidades (atualmente metade da população mundial vive em cidades) [6]. É fundamental, por isso, tomar medidas que assegurem um crescimento urbano sustentado. Outro problema (é importante realçar que todos eles se interrelacionam) é o elevado número de pessoas que vive em habitações precárias, em zonas coloquialmente conhecidas como favelas, que atinge mil milhões hoje em dia e que se nada for feito, poderá atingir 3 mil milhões em 2050 (cerca de 1/3 da população estimada para esse período) [7]. É também necessário encontrar soluções que proporcionem condições básicas de habitação aos 59,5 milhões de deslocados (1 em cada 122 pessoas) – conduzidos a isso fundamentalmente por guerras, violência e perseguições [8] – muitos dos quais ficam em campos de refugiados, tecnicamente transitórios até ser encontrada uma solução definitiva, mas que na verdade acolhem cada refugiado, em média, durante 17 anos (praticamente uma geração) [9]. É igualmente urgente encontrar soluções de habitação dignas para os 26,4 milhões de pessoas que anualmente, em média, veem as suas casas e áreas circundantes destruídas por catástrofes naturais [10].





Figura 3 – Cidade do México: 9 milhões de habitantes; Área metropolitana: 21 milhões de habitantes [11]



Figura 4 – Favela em Caracas, capital da Venezuela [12]

Assim, o sector encontra-se perante um quadro complicado: tem que dar o seu contributo para a resolução de importantes problemas sociais e também tornar-se mais apto para completar projetos tecnicamente mais exigentes, tudo isto, enquanto melhora progressivamente os seus aspetos negativos relacionados com eficiência e sustentabilidade. Alguns passos já foram dados nesse sentido: uma crescente aposta a nível da pré-fabricação e construção modular. Este tipo de produtos são executados em fábricas e numa fase posterior transportados para o local de construção, onde serão montados. Este procedimento permite um melhor controlo de qualidade, processos no local melhorados e mais eficientes, uma fabricação mais ecológica e reduções de custos [13].

Outra tecnologia emergente no campo da construção civil (que também poderá convergir com os princípios de pré-fabricação e construção modular anteriormente referidos), que poderá ter um papel

ativo na superação dessas dificuldades, é a vulgarmente chamada Impressão 3D. É um processo que o dicionário Oxford define como “a ação ou processo de criar um objeto físico a partir de um modelo digital tridimensional, tipicamente através da deposição de várias camadas finas de um material em sucessão” [14]. O usufruto desta tecnologia pode trazer a mecanização e automação de que este setor é carente, que pode por sua vez conduzir a melhores níveis de produtividade, uma vez que esta só usa o material necessário, estipulado pelo projeto CAD, reduzindo quase totalmente o desperdício, dispensa grande parte da mão de obra cujo trabalho é impreciso, principalmente quando comparado com o desempenho de uma máquina, e pode reduzir seriamente o tempo global de construção. Para além disto pode proporcionar uma exploração de novos materiais, incluindo materiais 100% naturais e recicláveis, e se possível provenientes do local onde se pretende construir. Tudo isto provocaria um menor impacto ambiental e naturalmente teria uma influência positiva nos custos globais da obra, podendo-os reduzir consideravelmente. Pode ser também importante para assegurar a execução de projetos complexos, uma vez que estas máquinas executam com a mesma facilidade qualquer tipo de superfície (por exemplo a superfície convexo-côncava referida no primeiro parágrafo poderia ser executada com a mesma facilidade do que uma superfície retilínea). Existem, no entanto, alguns desafios a ultrapassar para conseguir implementar a tecnologia no sector, sendo o primeiro os custos associados à implementação e desenvolvimento, tanto da máquina como de materiais adequados [15]. Há também o problema da escala, uma vez que a indústria da construção trabalha a uma escala consideravelmente superior à de outras indústrias, que já têm processos de automação há muito implementados. Também a singularidade de cada construção, não havendo oportunidade para uma produção standard em massa [15]. E ainda, em parte, o simples conservadorismo da indústria, que assume normalmente uma posição cética perante novas tecnologias, preferindo aguardar por perceber como se comportam noutras indústrias antes de as incorporar.

## **1.2. Objetivos**

A exploração da Impressão por parte do setor da construção, salvo algumas exceções, é relativamente recente e por essa razão existem ainda poucos estudos realizados e sobretudo divulgados sobre a matéria. Os que existem fazem-no de forma incompleta, não aprofundando algumas questões técnicas essenciais. Desta forma evidenciam-se as dificuldades encontradas na fase de recolha de informação e assinala-se um dos principais objetivos para esta dissertação que é precisamente o de criar um documento que manifeste o estado atual deste novo método construtivo, agregando o máximo de informação que foi possível recolher sobre os mais importantes desenvolvimentos já efetuados, pelas mais diversas entidades. O outro objetivo fundamental é o de refletir, de diversas formas, sobre (com base nas experiências já desenvolvidas) as repercussões que a integração desta tecnologia no meio da construção terá sobre ele.

Esta dissertação tem também a finalidade de, sendo um dos poucos trabalhos desenvolvidos em português sobre o tema, ser uma base elementar de trabalho que proporcione uma abordagem geral inicial a quem pretender desenvolver a tecnologia nesta área.

A tese suporta-se mais em ideias e noções do que em cálculos ou ensaios experimentais exatos, e assenta numa linguagem clara e objetiva, de forma a que os conteúdos sejam facilmente apreensíveis.

## **1.3. Estrutura**

Esta dissertação é composta por 6 capítulos, sendo o primeiro o presente capítulo introdutório.

O segundo capítulo constitui uma abordagem geral à tecnologia de impressão 3D.

O terceiro capítulo, designado *Casos de Estudo*, expõe, a partir da análise da informação previamente recolhida, as mais relevantes aplicações deste meio tecnológico, desenvolvidas até ao momento por diversas entidades ligadas ao setor da construção (empresas, startups, universidades), permitindo assim transmitir uma ideia das suas potencialidades. A ordem de exposição destes casos progride desde o mais simples até ao mais complexo.

O capítulo 4 versa sobre as implicações que a adoção desta técnica construtiva acarretará no desenrolar da obra, sobretudo do ponto de vista do Diretor de Obra, uma vez que este é responsável por um vasto conjunto de funções, que permitem transmitir uma perspetiva alargada do impacto da tecnologia.

O capítulo 5 é dedicado a uma reflexão sobre os desafios que a Impressão 3D terá de superar para aspirar a uma implementação geral e também sobre perspetivas de desenvolvimentos futuros da tecnologia.

O capítulo 6 e final corresponde à conclusão e contém como tal uma análise global final do trabalho já desenvolvido nesta área, que foi objeto de estudo desta dissertação e as perspetivas futuras de implementação.



# 2

## INTRODUÇÃO À IMPRESSÃO 3D

### 2.1. DEFINIÇÃO

O termo Impressão 3D – sinónimo do tecnicamente mais adequado Fabricação Aditiva (Additive Manufacturing, AM) – cobre na verdade uma diversa gama de processos e tecnologias, que oferecem a capacidade de produzir frações ou produtos completos desenhados em software CAD, a partir de diferentes materiais. O que estes processos têm em comum, e os unifica sob este termo, é a forma como a produção decorre: de forma aditiva, geralmente camada sobre camada [16]. O primeiro processo aditivo criado foi a Estereolitografia (Stereolithography, SLA), patenteada em 1987 pela empresa 3D Systems (ainda hoje uma das mais proeminentes na área), co-fundada por Chuck Hull, o criador do processo e consequentemente fundador da Impressão 3D [17].



Figura 5 – Primeiro objeto tridimensionalmente impresso: peça para um aparelho optométrico [18]

Esta metodologia de fabrico diverge dos métodos de produção subtrativos ou de injeção de moldes tradicionalmente empregues. Estes normalmente iniciam a atividade com um bloco, ou determinada massa de material, que vão sendo adaptados, por meio de várias técnicas – como corte, perfuração e trituração – ao formato desejado, gerando durante o processo um grande volume de resíduos que não terão qualquer finalidade e formam por isso desperdício. Este aspeto é negativo a todos os níveis: eficiência, economia e sustentabilidade. A Fabricação Aditiva por outro lado consegue executar exatamente a forma determinada pelo modelo digital, tendendo a usar apenas o material estritamente necessário (poderá haver desperdício, mas com baixos índices). Este processo também tem vantagens a nível da customização do objeto, podendo executar numa só sessão o objeto pretendido, consolidando assim várias etapas num só processo. Por exemplo, se se pretender produzir uma esfera oca, com métodos aditivos pode ser feito segundo um só processo, enquanto que de forma subtrativa terão, por

exemplo, de ser criadas duas semiesferas às quais será removido o interior e que depois ainda terão de ser fundidas entre si. Técnicas aditivas não implicam, portanto, a produção de várias peças e consequente necessidade de montagem (o que também tem reflexos positivos a nível de planeamento e controlo). Outra vantagem da Impressão 3D é a redução do tempo de aprovisionamento de um produto (Lead Time), ou seja, o tempo total que decorre desde a entrada do material até à sua saída do inventário. Sendo a tecnologia orientada para a produção local, com consideração das suas particularidades e necessidades, esta poderá ainda provocar alterações ou até uma mudança de paradigma em relação à logística e modo de funcionamento das tradicionais cadeias de aprovisionamento. [19], [20]

É, no entanto, também importante admitir que a Impressão 3D não está tão predisposta (pelo menos por enquanto) para a efetuar as produções maciças que a fabricação subtrativa consegue assegurar.

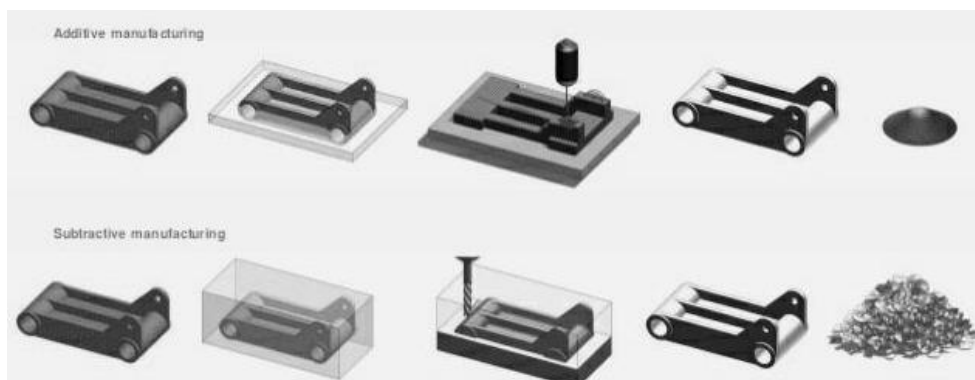


Figura 6 – Representação esquemática das diferenças entre os processos de fabricação subtrativa e aditiva [21]

De uma forma simples, o sistema de Impressão 3D desenrola-se de acordo com as seguintes etapas [22]:

- Concetualização.
- Elaboração tridimensional do objeto em plataforma CAD ou obtenção do mesmo a partir de um objeto real, com recurso a um scanner 3D.
- Conversão do ficheiro para o formato .stl (stereolithography, à semelhança do primeiro processo de impressão criado) ou .amf (additive manufacturing format) que é mais recente e pode suportar mais informação, mas que não é tão usado como o anterior.
- Processamento do ficheiro por parte de um software próprio, que irá “fatiar” o objeto e posteriormente traduzir o ficheiro para linguagem G-code, que contém as instruções que a máquina irá depois interpretar e executar.
- Envio do ficheiro para o computador instalado na máquina e configuração da mesma.
- Construção.
- Eventualmente, em alguns casos, limpeza e pós-processamento.
- Aplicação.

A operação dos aparelhos mecânicos é totalmente controlada por computador, num processo conhecido por Controlo Numérico Computadorizado (Computer Numeric Control, CNC), que já era amplamente usado em outros métodos de fabricação automatizados.

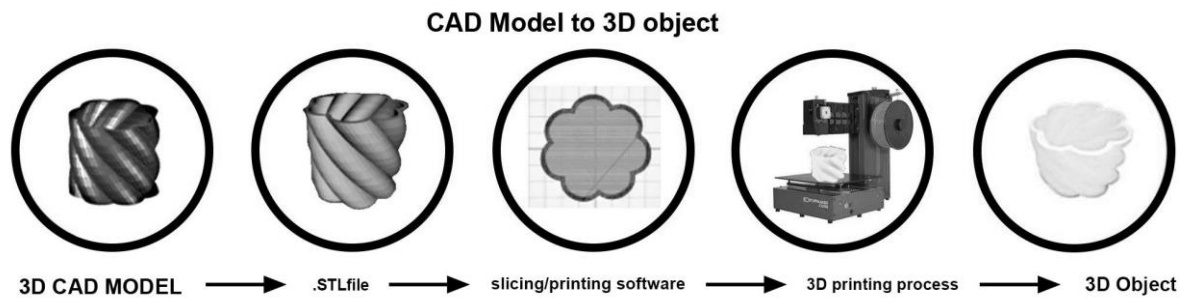


Figura 7 – Representação esquemática do processo de impressão 3D [23]

## 2.2. PROCESSOS

Com o desenvolvimento da tecnologia, vários outros processos de Impressão 3D foram criados após a Estereolitografia. Seguidamente apresentam-se os processos mais relevantes e globalmente aplicados.

### Estereolitografia (SLA)

Este processo, já referido anteriormente como o primeiro processo de fabrico aditivo criado, usa como matéria-prima resina polimérica no estado líquido, que deverá ser depositada numa tina. Uma membrana espalha uma camada deste material que será depois solidificada por ação de um laser UV. Este processo é repetido para cada camada até ser obtido o objeto previsto [16], [24], [25].

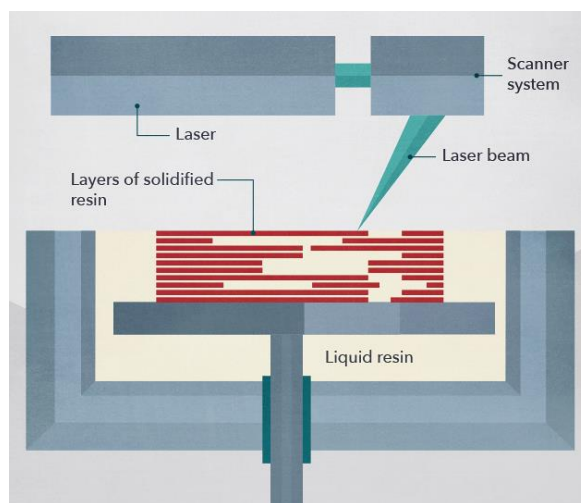


Figura 8 – Estereolitografia: esquema de funcionamento [26]

### Modelação por Deposição de Material Fundido (Fused Deposition Modeling, FDM)

Também conhecido Fabricação por Fusão de Filamentos (Fused Filament Fabrication, FFF). É um dos processos mais comuns devido ao baixo custo associado. Usa filamentos de termoplástico – ABS e PLA fundamentalmente – que são fundidos e extrudidos através de uma agulheta, na forma da secção transversal pretendida. Este processo é sistematicamente repetido até à criação completa do modelo. É importante realçar que, dependendo da geometria do objeto produzido, pode ter de se recorrer a uma

estrutura de apoio durante o processo (que poderá ser executada por uma cabeça de extrusão adicional) [16], [24], [25].

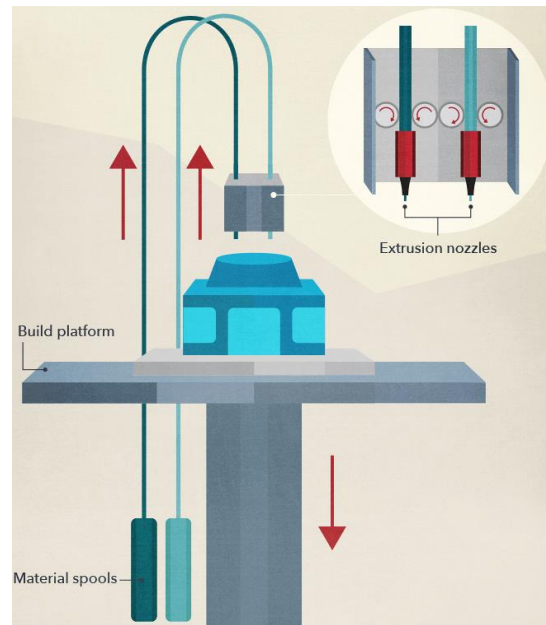


Figura 9 – Modelação por Deposição de Material Fundido: esquema de funcionamento [26]

### Sinterização Seletiva por Laser (Selective Laser Sintering, SLS)

Também conhecido por Fusão Seletiva por Laser (Selective Laser Melting, SLM). Usa material previamente reduzido a pó – geralmente termoplástico, nylon, metal (aço, titânio, alumínio, prata) ou materiais cerâmicos – que é disposto segundo uma camada e compacto por meio de um rolete. Depois sofre uma intensa aplicação de calor promovida por laser, que vai sinterizar ou fundir as partículas (depende do material utilizado), criando uma forte ligação estrutural entre elas que permitirá a formação de um elemento sólido. A câmara onde decorre o processo deve ser totalmente selada, uma vez que é fundamental manter a temperatura de fusão do material escolhido. As partículas granulares não sinterizadas durante o processo têm uma função de apoio estrutural, podendo ser recolhidas no final do processo e reaplicadas. É dos métodos mais evoluídos e mais precisos [16], [24], [25].

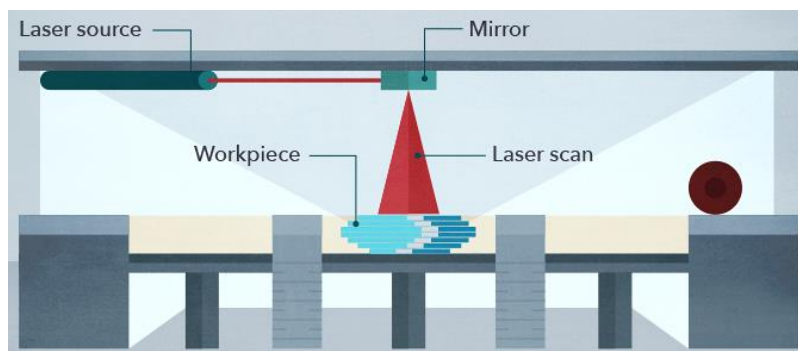


Figura 10 – Sinterização Seletiva por Laser: esquema de funcionamento [26]



### Binder Jetting (BJ, algo como Projeção de Aglutinante)

Esta técnica é bastante semelhante à empregada na impressão 2D. Utiliza matéria-prima granular, normalmente proveniente de ligas metálica ou polímeros, que é disposta da forma pretendida e ao qual vai ser associada, por projeção a partir de uma cabeça de impressão, um material aglutinante líquido, expelido por uma cabeça de impressão, formando dessa forma uma massa homogênea com tendência a solidificar. À semelhança do processo anterior, também neste, o material em pó que não reage quimicamente, atua como suporte em relação ao objeto criado, podendo, após conclusão do processo ser reutilizado [16], [24], [25].

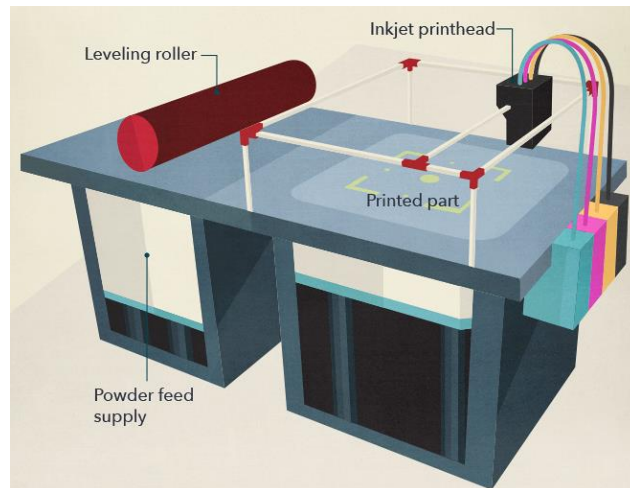


Figura 11 – Projeção de Aglutinante: esquema de funcionamento [26]

### Fabricação de Objetos Laminados (Laminated Object Manufacturing, LOM)

Não é um processo puro de Impressão 3D, uma vez que incorpora técnicas subtrativas, mas como é um processo substancialmente aditivo, pode ser enquadrado nesta categoria. O material base – papel, plástico ou metal – é laminado e sequencialmente colocado, colado e cortado (através de lâminas ou laser) até ser atingida a configuração pretendida [16], [24], [25].

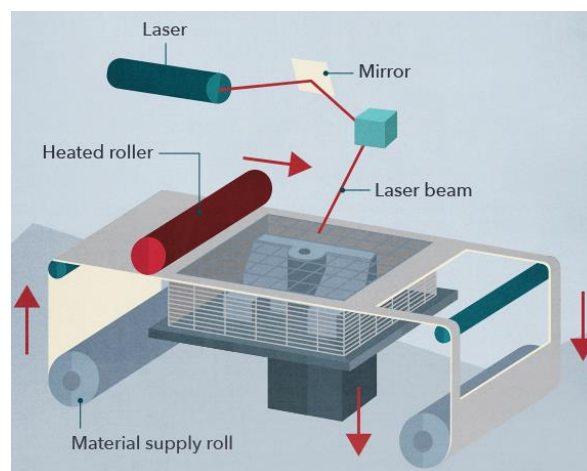


Figura 12 – Fabricação de Objetos Laminados: esquema de funcionamento [26]

Uma nota comum a todos os processos é que de cada vez que uma camada é completada, a plataforma baixa um nível para se iniciar a produção da camada seguinte. Os elementos de projeção mantêm-se, portanto, estáticos no sentido desse eixo vertical (z), operando apenas no plano XY.

É importante realçar que existem outros processos que podem divergir dos acima referidos em alguns aspetos, por exemplo no tipo de material granular utilizado, ou na fonte de calor utilizada (existe uma técnica que emite um feixe de eletrões, por exemplo). No entanto, a amostra abordada é muito abrangente, e proporciona uma visão completa das diversas técnicas.

### 2.3. ÁREAS DE APLICAÇÃO

A aplicação inicial da impressão 3D, que projetou a tecnologia e incentivou o seu desenvolvimento, ocorreu na área da prototipagem rápida (Rapid Prototyping, RP) – sobretudo de peças mecânicas – uma vez que permitiu a criação de forma rápida e barata de modelos físicos, passíveis de ser testados e discutidos, numa fase preliminar do processo de fabrico [17].

A tecnologia, à semelhança do computador e telemóvel, à medida que evoluiu e começou a ser consumida, tornou-se mais barata, móvel e por isso mais acessível, conseguindo dessa forma ingressar em diversos mercados, que deram o seu próprio contributo para o seu desenvolvimento. Também a expiração de algumas patentes chave que estavam a contrair o mercado, nomeadamente uma relacionada com o processo FDM (um dos mais baratos) em 2009, permitiu uma grande expansão no domínio desta tecnologia e deu origem ao boom que se fez sentir no início da presente década [17], [27].

Atualmente está presente em diversas indústrias, laboratórios e centros de investigação, já existindo também modelos profissionais – orientados para empresas e escolas – e modelos pessoais, dirigidos para uso particular.

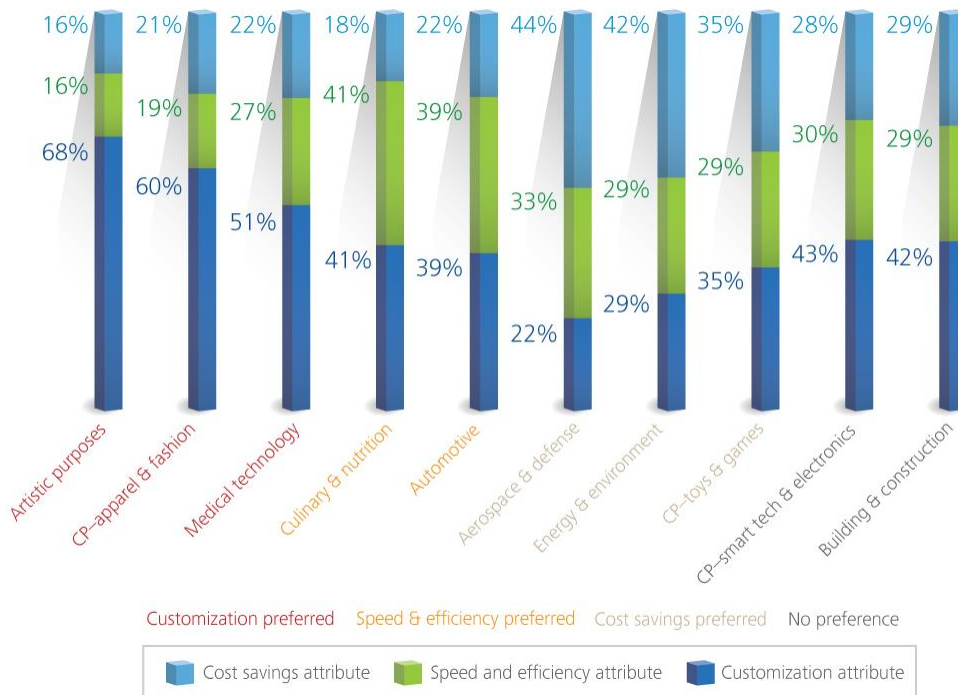


Figura 13 – Principais áreas de aplicação da Impressão 3D e atributos preferenciais, estudo desenvolvido pela Deloitte [27]

De seguida expõem-se algumas das mais relevantes aplicações da tecnologia, relativas às áreas que de forma mais proeminente a têm usado e explorado.

### Indústria aeroespacial

Uma das primeiras áreas de aplicação, com o intuito de criação de protótipos de forma rápida, algo que continua a ser feito extensivamente. A produção de elementos para esta indústria não é massificada e engloba muitas peças complexas (à base de metais e ligas metálicas avançados), o que torna os métodos de fabrico aditivos muito adequados. A partir destes produzem-se componentes complexos para motores, helicópteros e satélites [16], [28].



Figura 14 – Peças normais vs peças com design otimizado impressas tridimensionalmente [29], [30]

### Indústria automóvel

À semelhança do exemplo anterior, esta indústria começou cedo a usar esta tecnologia nos campos da prototipagem rápida e desenvolvimento do produto, tendo depois progredido para a fabricação definitiva dessas mesmas componentes. Entre elas encontram-se, por exemplo, tubos de escape, eixos de transmissão, peças da caixa de velocidades e sistemas de frenagem. É também útil na produção de peças para carros de competição, que normalmente têm de ser muito leves e assentam numa estrutura intrincada [16], [28].



Figura 15 – Peças complexas impressas tridimensionalmente [31]

## Medicina e medicina dentária

Foi também um dos primeiros setores a adotar a tecnologia e é um dos que tem mais potencial. A customização que as técnicas de impressão 3D proporcionam possibilitam a criação de próteses e implantes adequados às necessidades e características morfológicas próprias de cada paciente.

Numa fase ainda mais experimental, sem expectativa de comercialização a curto prazo, já se está a desenvolver a possibilidade de impressão de farmacêuticos, mas também de ossos, tecido e órgãos vivos (produzidos a partir de células vivas) [16], [28].



Figura 16 – Exemplo de possíveis implantes – perna e dente – gerados por impressão 3D [32], [33]

## Arte e moda

Estas áreas, nas quais o processo criativo é preponderante, viram com agrado as potencialidades desta tecnologia. Vários artistas plásticos, em particular escultores, encontraram nesta tecnologia uma forma mais direta de conceber com precisão as suas ideias e de explorar novas técnicas e materiais.

Na área da moda, algumas peças de vestuário, mas fundamentalmente vários acessórios – malas, chapéus e calçado – com design arrojado, já foram criados, a partir de materiais pouco habituais nesse meio. Também se está a desenvolver calçado orientado para atletas, com possibilidade de personalização consoante as suas características físicas, tendo em vista a obtenção de uma configuração especial, que permita melhorar a performance e evitar lesões.

Também foram produzidas armações de óculos, em materiais que lhes permite tornarem-se mais leves e com um formato adaptado ao rosto da pessoa a quem se dirigem, de forma a melhorar a comodidade.

No campo da joalheria, também abre fronteiras para novos desenhos, mais ousados e complexos, e permite eliminar ou simplificar algumas etapas do processo tradicional, que tornavam a fabricação de peças nesta área muito complicada. [16], [28]

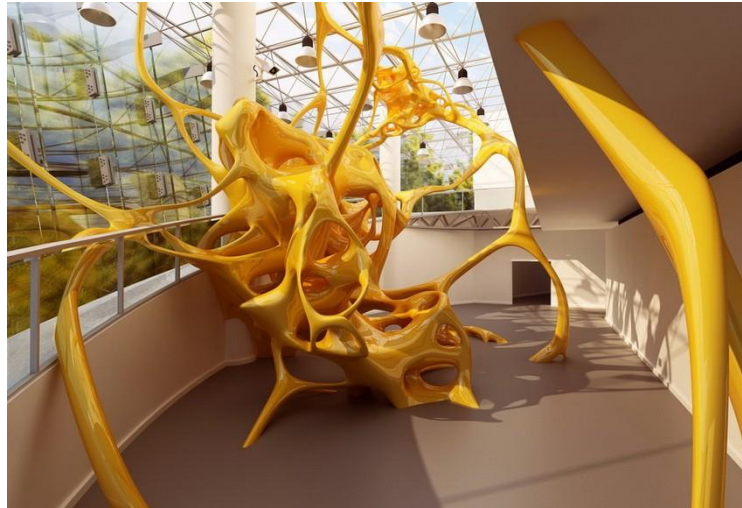


Figura 17 – Escultura/instalação concebida digitalmente e impressa a três dimensões [34]



Figura 18 – Vestido e sapatos, respetivamente, tridimensionalmente impressos [35], [36]

Surgem regularmente novas aplicações e materiais. As possibilidades são intermináveis, desde que sejam reunidas as condições base de existência de um ficheiro CAD tridimensional, material adequado e uma impressora com características que permitam executar o projeto pretendido.

Existe até uma iniciativa – RepRap – cujo âmbito é desenvolver uma impressora 3D de baixo custo, que tenha a capacidade de produzir a maioria das suas peças, ou seja, que se possa auto-replicar. Essa impressora seria distribuída por pontos estratégicos ou até comunidades, a partir dos quais se disseminaria a tecnologia [37].

## **2.4. IMPRESSÃO 3D APLICADA À CONSTRUÇÃO**

Naturalmente que esta tecnologia e as cativantes potencialidades que sugere – automação e produção no local, redução de custos, redução de desperdícios e efeitos poluentes e ainda a grande liberdade de design permitida, e as possibilidades que isso proporciona no domínio da funcionalidade e otimização estrutural – também geraram interesse no sector da construção civil. No entanto percebiam-se à partida alguns entraves. O conservadorismo da Indústria da Construção e as dúvidas perante uma tecnologia ainda não completamente estabelecida, a escala a que opera, que iria exigir máquinas de dimensões muito superiores às até então usadas e ainda os custos consideráveis que o desenvolvimento e implementação da técnica na área iriam envolver. Não obstante, várias personalidades e entidades assumiram esse empreendimento e impulsionaram o desenvolvimento de diversos projetos. Os mais relevantes serão objeto de análise no próximo capítulo.

# 3

## IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO: CASOS DE ESTUDO

### 3.1 ENQUADRAMENTO

Várias aplicações do processo de fabrico aditivo foram pensadas e desenvolvidas, a partir de distintos campos, tendo em vista a sua adaptação ao sector da construção civil. Núcleos de investigação de universidades, empresas de arquitetura e construção e ainda iniciativas de pessoas não filiadas a nenhum tipo de organização, que decidiram desenvolver as suas ideias por conta própria, motivando muitas vezes, mais tarde, a criação de startups.

O presente capítulo pretende dar a conhecer os projetos mais interessantes e com capacidades mais promissoras desenvolvidos até ao momento. É importante perceber que a maioria destes projetos são “work in progress” (projetos em desenvolvimento) e provas de conceito, ou seja, são modelos experimentais destinados a comprovar um conceito teórico, encontrando-se ainda em fase empírica, e dessa forma é importante não os interpretar de uma forma definitiva, mas numa perspetiva mais alargada, projetando as suas potencialidades futuras. Também é necessário realçar que a quantidade de informação publicamente disponível relativa a cada caso é variável (não sendo abundante em nenhum) e que por esse motivo alguns casos serão inevitavelmente abordados de forma mais superficial do que outros, mas que deverão ser suficientes para compreender o processo tecnológico e possíveis implicações. Tentar-se-á recorrer sempre que possível a imagens elucidativas que permitam auxiliar a assimilação das ideias descritas.

A ordem de exposição decorrerá sequencialmente, do caso mais simples, que propõe o recurso a esta tecnologia para desenvolver modelos, componentes ou treços, progredindo gradualmente até aos casos mais ambiciosos e complexos, que requerem uma maximização da intervenção da impressora 3D. Os procedimentos compreendidos entre a elaboração do desenho CAD e transmissão das instruções para a impressora, uma vez que são comuns a todos os processos, não serão referidos para evitar repetição, partindo-se do pressuposto (necessário para as fases subsequentes) de que eles foram previamente efetuados.

Na área da construção, o software CAD já está plenamente implementado e tem continuamente sofrido aperfeiçoamentos, não sendo dessa forma um entrave à implementação da Impressão 3D no setor. Os principais obstáculos surgem associados às outras duas características fundamentais do processo: materiais e máquina responsável pela produção.

Relativamente aos materiais, vários têm sido continuamente desenvolvidos e testados. Muitos deles são materiais tradicionais com algumas adições, outros são completamente inovadores, quanto à sua génese e características. Tem sido dada muita importância à procura de materiais biodegradáveis e recicláveis,

bem como ao desenvolvimento da capacidade da impressora para empregar materiais provenientes do local onde vai decorrer a construção. Algumas das exigências que estes têm de verificar são a necessária resistência estrutural que uma edificação implica e a consolidação correta de uma camada antes da deposição da seguinte, mantendo sempre um nível de humidade que permita uma boa aderência (duas exigências de difícil conciliação, e que complicam a criação destes materiais).

Quanto à máquina, inevitavelmente aparelhos próprios, de grandes dimensões, tiveram de ser criados para permitir o aumento de escala necessário, passando a assemelhar-se a braços robóticos industriais e perdendo qualquer relação com as impressoras tipicamente usadas. É ainda de notar a interdependência entre material e máquina – normalmente um é criado por subordinação ao outro – e a necessidade de funcionamento consonante entre os dois.

## **3.2 CASOS DE ESTUDO**

### **3.2.1 MODELOS ARQUITETÓNICOS**

Uma das vertentes na qual este processo tecnológico pode ser aplicado de forma simples e direta, é na criação de modelos físicos tridimensionais à escala – vulgas maquetes – muito úteis como ponte de ligação entre o mundo físico e o mundo digital, proporcionando uma compreensão mais sensível do projeto e de alguns dos seus detalhes essenciais. Podem também ser impressas apenas partes – de forma a permitir a visualização interna – que depois poderão ser interligadas, com recurso a resinas epóxi, até formarem o modelo completo.

Estes modelos, dependendo das dimensões pretendidas, podem levar menos de 1 dia a serem criados, enquanto que pelas medidas tradicionalmente empregues – que são fundamentalmente manuais – levam em geral algumas semanas a serem concluídos. Existe, portanto, uma enorme diferença a nível de tempo de produção e exigência técnica associada entre processos tradicionais e impressão 3D. Outra vantagem desta mais recente tecnologia é a possibilidade de executar, sem dificuldades acrescidas, detalhes arquitetónicos como texturas (pode simular tijolo numa parede, por exemplo), formas complicadas como superfícies curvilíneas e elementos intrincados, como escadas e corrimões, todas elas de difícil concretização por meios simplesmente manuais.

Este meio tecnológico oferece ainda a possibilidade de a partir de informações espaciais e geográficas, obtidas por sistemas GIS (Geographic Information System), decalcar no modelo uma representação fidedigna do terreno envolvente. Esta capacidade pode ser particularmente útil em situações de terrenos de difícil acesso, cuja reprodução detalhada permitiria perceber a sua constituição numa fase ainda inicial de projeto. [38], [39], [40]

Os países nórdicos, com a Dinamarca à cabeça, têm sido pioneiros na aplicação desta tecnologia na criação de modelos físicos tridimensionais. Dentro deste grupo, têm-se destacado duas prestigiadas empresas, ambas sediadas em Copenhaga: Ramboll Group e HLA (Henning Larsen Architects).

A HLA reconhece que as maquetes refinadas que produzem recorrendo a esta tecnologia, permitem transmitir com clareza algumas singularidades e ideias do projeto, o que revelou utilidade na participação em concursos que acabaram por vencer, com destaque para o projeto que desenvolveram para o Centro de Concertos e Conferências de Reiquiavique, capital da Islândia [38]





Figura 19 – Sequência: Design digital tridimensional; Modelo Físico Tridimensional gerado por Impressão 3D; Obra após Conclusão [41], [38], [42]

Também a empresa Ramboll Group – que efetua diversos serviços no ramo da engenharia civil, enquanto que a anteriormente referida HLA trabalha no campo da arquitetura – reconhece mérito e utilidade às maquetes desenvolvidas por Impressão 3D, uma vez que a terceira dimensão destes modelos permite uma compreensão profunda das exigências e possibilidades a nível de engenharia que os projetos implicam. Um exemplo ilustrativo ocorre no projeto desenhado pelo arquiteto Norman Foster e adjudicado a esta empresa, relativo a duas cúpulas de vidro destinadas a albergar elefantes no Zoo de Copenhaga [39].

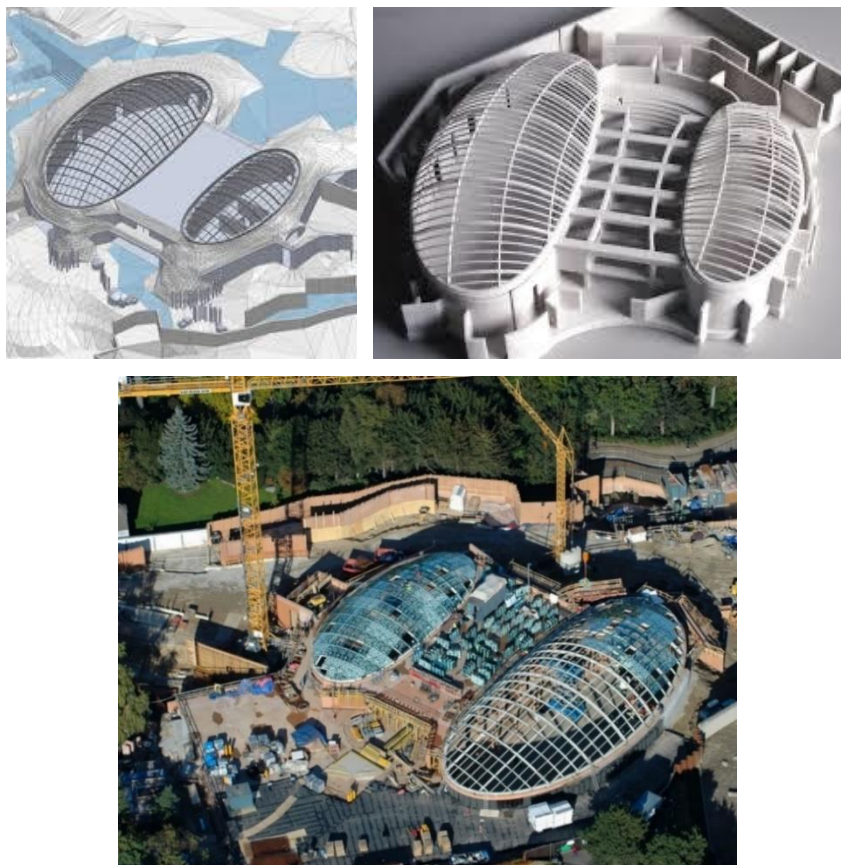


Figura 20 – Sequência: Design CAD; Modelo Físico Tridimensional gerado por Impressão 3D; Obra no decorrer do processo de execução [43], [39], [44]

Ambas as empresas utilizam impressoras completamente correntes e que não sofreram qualquer tipo de adaptação.

A HLA usa uma Z Corp Z450 e a Ramboll Group uma Spectrum Z510, ambas desenvolvidas e comercializadas pela Z Corp, filial da 3D Systems.



Figura 21 – a) Zcorp Z450 [45], b) Spectrum Z510 [46]

### 3.2.2 EMERGING OBJECTS – COOL BRICKS E QUAKE COLUMN

A Emerging Objects, subsidiária da maior Rael San Fratello, é uma empresa californiana sediada em Oakland, que se dedica de acordo com as palavras dos seus fundadores a “pesquisa arquitetónica aplicada”. Estudam, desenvolvem e testam materiais pouco convencionais e concebem estruturas experimentais. Têm uma abordagem modular em relação à impressão 3D e sua aplicação na construção, ou seja, defendem a criação de peças pequenas para na sua associação construir algo maior. Desta forma excluem a necessidade de uma impressora maior, algo que a maioria das outras empresas do sector da construção que se aventura por esta área vê como indispensável.

Para além deste princípio de unidade básica, a empresa defende a adaptação do produto às exigências específicas do local a que se destina e dá preferência à utilização de materiais aí existentes. [47]

Uma das iniciativas da firma que melhor demonstra a assimilação destes ideais é o Cool Brick. É orientado para ambiente desérticos, portanto quentes e secos, e consiste na produção de tijolos a partir de um material cerâmico poroso, que iriam permitir o arrefecimento e humedificação da edificação, de forma passiva, recorrendo exclusivamente a água e ao ar quente exterior. É um modelo inspirado numa técnica tradicional de arrefecimento conhecida como Evaporative Cooling (algo como Arrefecimento por Evaporação) e pode ser compreendido pela seguinte figura [48].

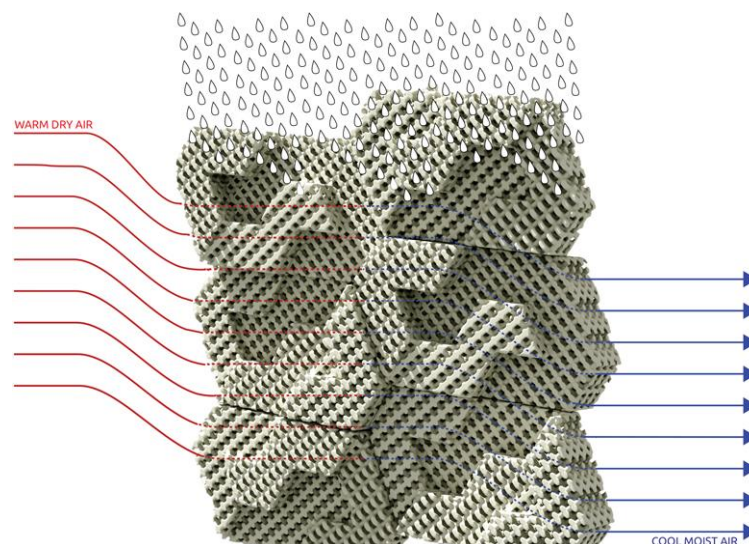


Figura 22 – Arrefecimento por Evaporação numa parede constituída por Cool Bricks [48]

Os poros dos tijolos permitem a infiltração de partículas de água e mais tarde também permitem a circulação do vento exterior, que é mais quente e que por isso vai provocar a evaporação destas partículas de água para o interior da edificação, arrefecendo-a.

A forma dos tijolos permite que sejam perfeitamente combinados entre si com recurso a argamassa, e o elemento estrutural resultante revela-se coeso e resistente.

Outra característica do tijolo, que o adequa para ambientes áridos, é a sua configuração, com saliências, o que conduz a superfícies de sombra na parede, permitindo que uma grande parte desta se mantenha protegida do sol e, portanto, mais fria. Na figura 21 está exposto um elemento constituído por vários tijolos, no qual se pode observar as características acima referidas: as proeminências que estes apresentam e a união estabelecida entre eles através de uma argamassa. [48]



Figura 23 – Detalhe de um elemento composto por vários tijolos [48]

Outra das iniciativas mais interessantes desenvolvidas pela empresa é a Quake Column, que consiste numa coluna – mais uma vez constituída por um conjunto de blocos – que é altamente resistente à ação sísmica. A construção desta coluna foi inspirada em técnicas construtivas utilizadas pelo povo Inca, nas suas edificações no Perú – zona de grande atividade sísmica – muitas das quais ainda subsistem tantos séculos após a sua construção.

A estrutura é composta por uma formação pré-definida de blocos ocios empilháveis entre si, combinados de forma a criar uma estrutura torcionária e oscilável, otimizada para vibrações intensas em zonas de atividade sísmica. Cada bloco está numerado (linha e coluna) para facilmente ser localizada a sua posição, e possui uma superfície própria para ser agarrado, facilitando assim o seu transporte e colocação. Não é aplicada argamassa para unir os blocos, e esse é um dos pontos fundamentais para o sucesso da coluna, uma vez que o que se pretende é a absorção das vibrações e as juntas de argamassa geralmente sofrem deterioração nos pontos de concentração de tensão. Sem argamassa, os módulos da coluna podem adaptar-se às vibrações e restabelecer-se rapidamente sem risco de colapso. Para além disso, cada módulo possui cantos arredondados e uma superfície não linear, tendo em vista o aumento da resiliência face a atividade sísmica. A coluna ainda deverá possuir, à semelhança das estruturas Inca, uma inclinação entre 3 e 5 graus. [49]



Figura 24 – Quake Column com alguns detalhes em evidência [49]

A impressora 3D que esta empresa usa aplica o processo de impressão Binder Jetting (BJ) e por esse motivo todos os materiais que utilizam são previamente reduzidos a pó. Para além dos materiais aplicados nos projetos referidos anteriormente, a empresa também tem desenvolvido projetos utilizando como matéria-prima elementos menos comuns para estes efeitos como madeira e sal. Este último é colhido localmente, a partir da Baía de São Francisco, e tem sido usado, por exemplo, na construção de uma estrutura experimental, conhecida por Saltygloo, que é baseada nos Igloos Inuítes. Este material para além de ser abundante e 100% natural, possui as vantagens formar uma estrutura leve, com paredes translúcidas, possibilitando assim a entrada de luz natural [50].



Figura 25 – Perspetivas do Saltygloo, construído à base de sal [50]

### 3.2.3 ARUP

A ARUP é uma empresa multinacional sediada em Londres, que presta diversos serviços de engenharia e arquitetura, distinguindo-se pela sua atividade no domínio da consultoria. Está presente em diversos países, em todos os continentes. A firma tem uma matriz de cooperação interdisciplinar e tem a sustentabilidade como um dos principais pilares. É reconhecida a competência dos seus quadros, que frequentemente recorrem a abordagens inovadoras e sofisticadas. Assim se compreende a sua associação a alguns dos projetos mais arrojados desenvolvidos nas últimas décadas. Alguns exemplos, para se compreender a complexidade dos projetos em que a empresa se envolve, são: a Ópera de Sidney, o Hotel Marina Bay Sands, em Singapura, o Estádio Nacional de Pequim, ou a mais familiar Casa da Música do Porto. Grande parte da estrutura destas edificações invariavelmente implica o envolvimento de aço. Motivada por estas exigências, a ARUP iniciou, recorrendo a uma impressora 3D comercial, o desenvolvimento de componentes otimizadas para estruturas metálicas, muitas delas orientadas para este tipo de projetos complexos. O material usado é aço maraging – conhecido pela alta dureza, enquanto mantém a maleabilidade – que pode ser até 4 vezes mais resistente do que o aço tradicionalmente aplicado na construção [51].



Figura 26 – Nós metálicos [52]

Na figura 23 estão representados três nós metálicos. O da esquerda foi fabricado com recurso a métodos tradicionais, enquanto que os outros foram produzidos por processos aditivos. A peça da direita – uma das mais recentes – comparada com a da esquerda, tem cerca de metade da altura e é cerca de 75% mais leve. No entanto essa peça, apesar de ser consideravelmente mais pequena e leve consegue desempenhar exatamente as mesmas funções e suportar as mesmas cargas. Utilizando técnicas aditivas é, portanto, possível desenhar peças com uma forma complexa e tendencialmente mais orgânica que implique apenas o uso da quantidade de material necessário para suportar as cargas. Isto pode tornar a estrutura significativamente mais leve. Se considerarmos a substituição futura das peças criadas tradicionalmente, os engenheiros da ARUP estimam que o peso total da estrutura metálica possa decrescer até 40%. Para além dessa vantagem, outras surgem por correlação, como redução de custos, do desperdício e da pegada de carbono associada ao processo construtivo [53].

É, no entanto, importante realçar que a própria empresa admite que nesta fase ainda inicial e empírica, do ponto de vista financeiro ainda continua a ser mais vantajoso o recurso a métodos tradicionais do que a tecnologia de Impressão 3D.

#### 3.2.4 BRANCH TECHNOLOGY

A Branch Technology é uma startup originária do estado do Tennessee, nos EUA. Tem uma abordagem particular tanto em relação à construção como à forma como direciona a Impressão 3D para esse efeito.

De acordo com as ideias do fundador, Platt Boyd, “construímos da mesma forma há 10.000 anos. Os elementos que usávamos antes, usamos agora: pilares e vigas”. Também afirma que “quando a geometria não é um problema, então é possível fazer praticamente tudo”.

Partindo destas premissas, a empresa desenvolveu um conceito original: uma parede modular, que combina uma espécie de armação à base de plástico impressa tridimensionalmente, com materiais de construção convencionais. Esta conceção é bio inspirada e assemelha-se, por exemplo, à forma como o esqueleto humano está estruturado: existe uma simples e leve armação na qual os materiais mais densos são adicionados, aumentando a força e integridade da estrutura como um todo. O facto de a estrutura interna ser impressa tridimensionalmente garante-lhe uma imensa liberdade de forma e a possibilidade de ser composta por uma geometria otimizada, que se estenderá às restantes componentes da parede que nela assentarem, uma vez que é ela que define a forma do elemento. Assim a armadura teria no fundo um propósito de modelação, à semelhança da função que as cofragens desempenham, determinando a configuração pretendida, perdendo depois relevância, uma vez que são os materiais aplicados posteriormente que conferem resistência à estrutura. A constituição dessa matriz consiste em plástico

ABS (95%) – o mesmo que se usa para fabricar Legos – reforçado com fibras de carbono (5%). Para criar a armação, a companhia recorreu a um braço robótico KUKA, desenvolvido pela empresa KUKA ROBOTICS, que se desloca ao longo de um rail, e que foi devidamente adaptado para garantir as condições exigidas. As dimensões da máquina são: 3,8m (12,5 pés) o braço e 10,7m (35 pés) o rail, o que perfaz uma área total de impressão de sensivelmente 7,6m (25 pés) de largura por 17,7m (58 pés) de comprimento.

A empresa também desenvolveu uma forma característica de fabricação aditiva, denominada Fabricação Celular (Cellular Fabrication, C-fab), que não implica a execução por intermédio de camadas sobrepostas. [54], [55]



Figura 27 – Braço robótico KUKA assente em carril [56]

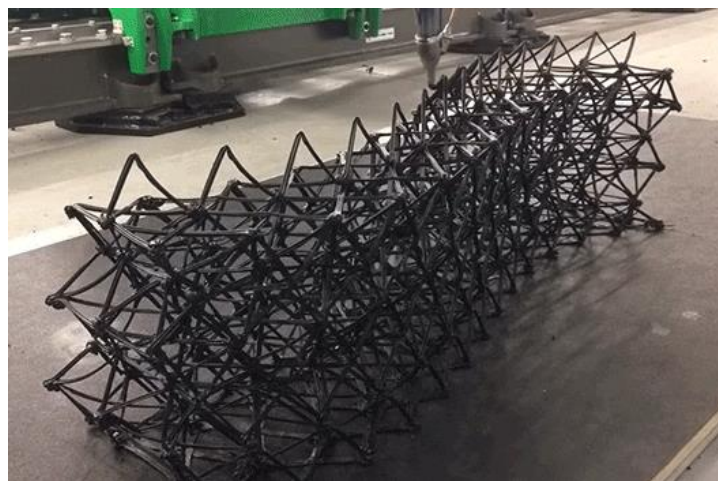


Figura 28 – Produção de uma armadura experimental [56]

O sistema, como pode ser compreendido pela figura 27, processa-se da seguinte forma: a impressora KUKA extrude o plástico ABS reforçado na forma da estrutura vertical definida no design CAD (que será a única componente da parede impressa). Após término da impressão e estando já a armadura

devidamente consolidada, esta é preenchida com uma camada de espuma isolante e outra de betão, sendo posteriormente, em cada uma destas superfícies, realizado o acabamento exterior e interior, respetivamente. É relevante realçar que o projeto pode contemplar orifícios destinados à passagem de canalização e fios elétricos e também aberturas para portas ou janelas. Os materiais também podem variar [57].

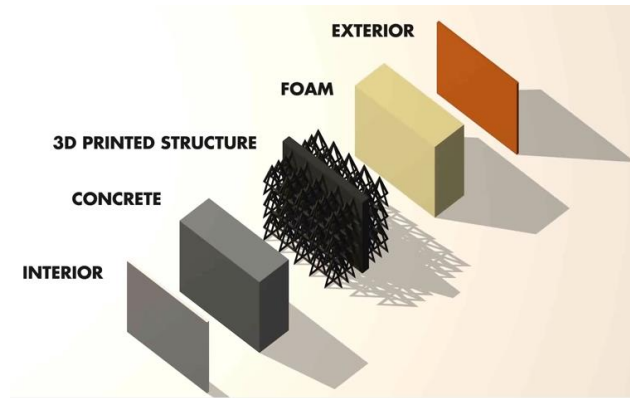


Figura 29 – Estrutura da parede segundo o conceito da empresa [57]



Figura 30 – Troço de parede experimental [55]

Ainda estão a ser realizados esforços para melhorar a resistência estrutural da armação interna, mas estima-se que uma estrutura com um peso de apenas 0,7kg (1,5 libras) possa suportar uma carga de 700kg (1500 libras), ou seja, cerca de 1000 vezes a sua massa. Esta característica está ilustrada de forma algo grosseira na figura 31, na qual um modelo de pequena escala de uma parede foi sobrepassado por uma carrinha e permaneceu intacto [58].





Figura 31 – Exemplo da resistência estrutural de um modelo de pequena escala da parede [58]

Nesta fase a ideia da empresa é que o esqueleto de plástico seja impresso em fabrica, em vários troços, e depois transportado – dois homens conseguem carregar cada troço – para a obra, onde poderão ser soldados entre si e compor a estrutura final.

### 3.2.5 IAAC – PYLOS E MINI-BUILDERS

O IAAC - Instituto para Arquitetura Avançada da Catalunha – com base em Barcelona, é um centro internacional de investigação e educação, dedicado à pesquisa de soluções arquitetónicas inovadoras, capazes de satisfazer as exigências da construção atual.

Têm realizado alguns desenvolvimentos interessantes no campo da Impressão 3D. Um dos projetos – Pylos – assenta no desenvolvimento de uma matéria-prima que é abundante e permite assegurar os ideias que a empresa promove: o solo. Alguns dos seus benefícios, reconhecidos pela empresa, são:

- isolamento térmico natural;
- proteção contrafogo;
- possibilita a circulação de ar através das porosidades;
- custo base baixo;
- estruturas totalmente recicláveis;
- rigidez;
- resistência;
- a sua aplicação produziria baixas emissões de gases de estufa.

O material final criado pela IAAC é constituído por 96% de solo, correspondendo a restante percentagem a aditivos que permitirão melhorar as suas características. Este método de fabrico minimiza a quantidade de energia necessária para decorrer, e uma vez que é executado in-situ, exclui as dificuldades e riscos relacionados com transporte. O preço estimado pela empresa é de 0,5€ por cada kg.

É orientado fundamentalmente para a construção habitacional em países em desenvolvimento, ou em zonas densamente urbanizadas em países desenvolvidos. Devido aos baixos custos associados deverá proporcionar um acesso a habitação mais fácil e barato às pessoas mais carenciadas. [59], [60]



Figura 32 – Elementos produzidos à base do material desenvolvido no projeto Pylos [61]

Outra importante iniciativa do instituto na área da Impressão 3D, relaciona-se com o desafio do aumento de escala que a construção implica. Nesse sentido, desenvolveram um projeto denominado Mini-Builders, que consiste no desenvolvimento de 3 robôs móveis de pequenas dimensões, cada um projetado para executar uma função específica. Estes robôs operaram em conjunto: cada um desempenha a sua tarefa numa sequência pré-definida, complementando-se entre si. É uma ideia que se assemelha à de Linha de Montagem industrial, na qual um produto é produzido segundo uma sequência de tarefas, cada uma delas realizada sempre pelo mesmo trabalhador, na mesma fase. Desta forma consegue-se atingir o aumento de escala desejado, sem que para isso tenha sido desenvolvida uma máquina de grandes dimensões, ou seja, a construção já não estaria limitada à dimensão da máquina. [62]

O processo decorre da seguinte forma [63]:

**Notas:**

- Todos os robôs possuem ligações tubulares a um engenho que contém o material e que é responsável pela sua propulsão;
- Vários robôs da mesma categoria podem operar em simultâneo.
- Podem ser efetuadas aberturas para portas e janelas, bem como condutas para instalações elétricas e hidráulicas, de acordo com o projeto.

O primeiro robô – Robô Base (Base Robot) – move-se ao nível do solo sobre duas lagartas e é responsável apenas pela deposição das primeiras 10 a 20 camadas de material (dependendo da espessura determinada), ou seja, a base da estrutura tal como o seu nome indica.

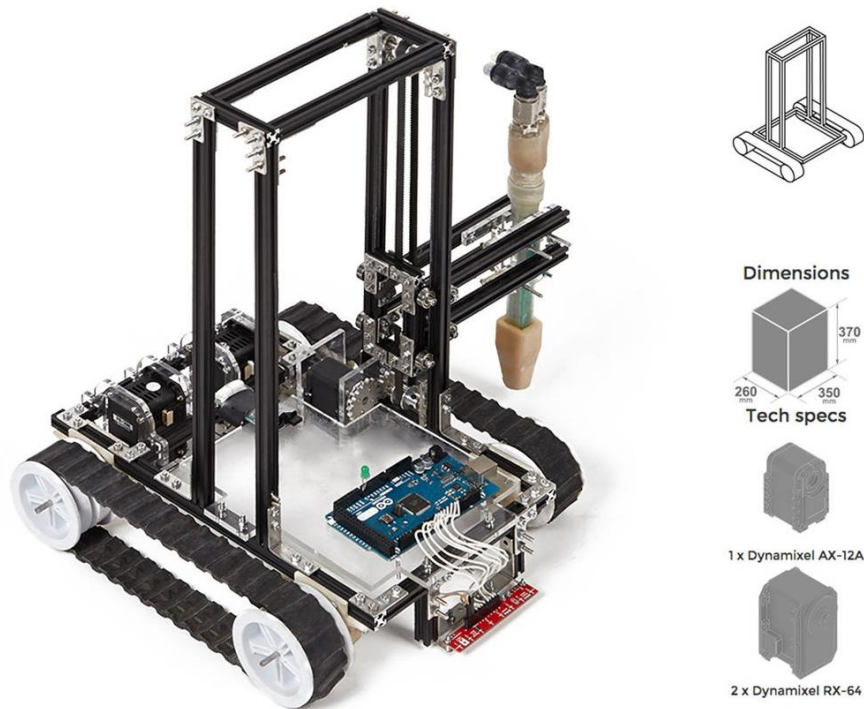


Figura 33 – Robô Base e respectivas dimensões (mm) [63]

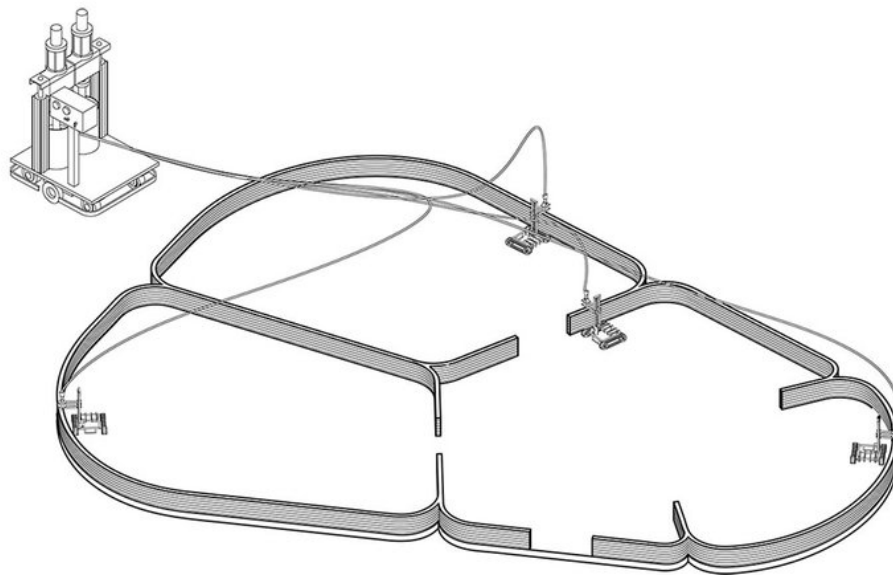


Figura 34 – Demonstração da função desempenhada pelo Robô Base [63]

O segundo robô – Grip Robot (sem tradução) – foi desenhado para se poder instalar sobre a estrutura e para sobre ela se mover, em todas as direções, através de quatro roletes. É responsável pela execução das restantes camadas, incluindo as que vão formar a cobertura. A sua cabeça de impressão pode mover-se transversalmente, permitindo assim a formação de superfícies curvas. É possível imprimir horizontalmente porque o processo de cura é extremamente rápido. Este processo é agilizado em parte devido à transmissão de calor efetuada por dois pequenos elementos aquecedores incorporados no robô.

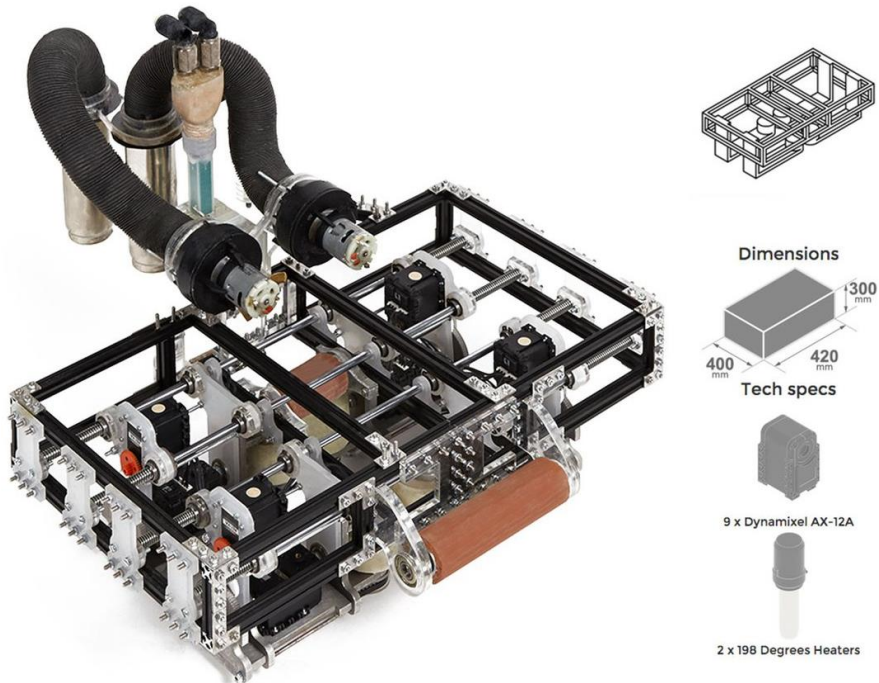


Figura 35 – Robô Grip e respectivas dimensões (mm) [63]

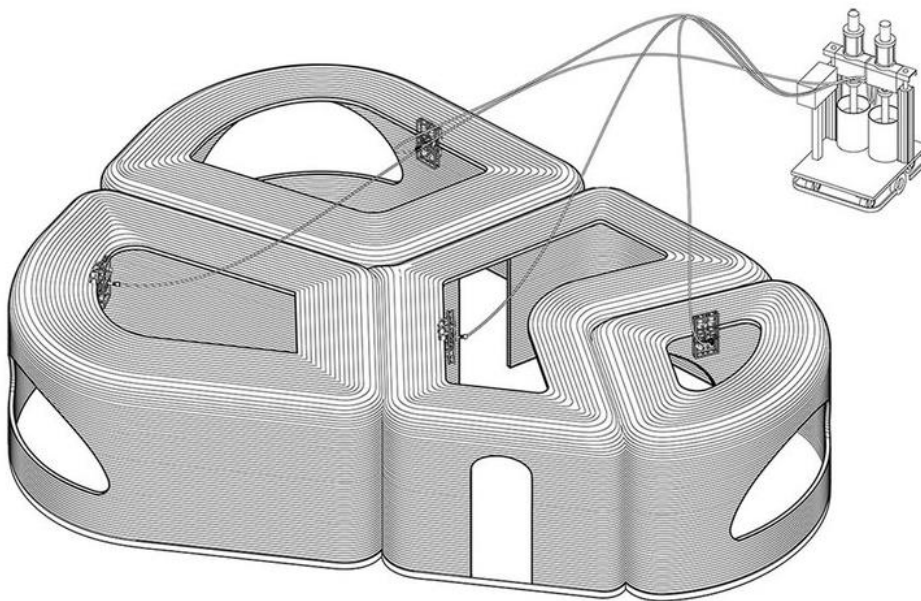


Figura 36 – Demonstração da função desempenhada pelo Robô Grip [63]

O terceiro e último robô a atuar é conhecido por Robô Vácuo (Vacuum Robot). O robô adere à superfície da estrutura por meio de uma ação conjunta entre uma ventosa e um gerador de vácuo. Tem uma função de reforço estrutural, ou seja, gera mais camadas sobre as anteriormente erguidas. Estas camadas não têm necessariamente de ser horizontais, e não têm de ser distribuídas uniformemente por toda a estrutura,

podendo apenas ser aplicadas nas zonas críticas. Pode-se mover em todas as direções por via de duas lagartas, tal como o Robô Base.

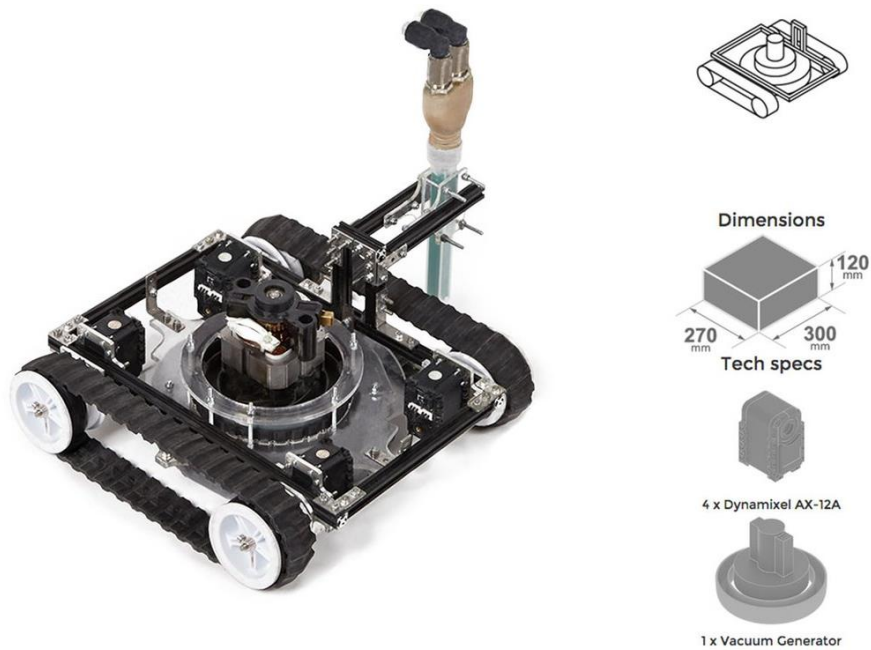


Figura 37 – Robô Vácuo e respetivas dimensões (mm) [63]

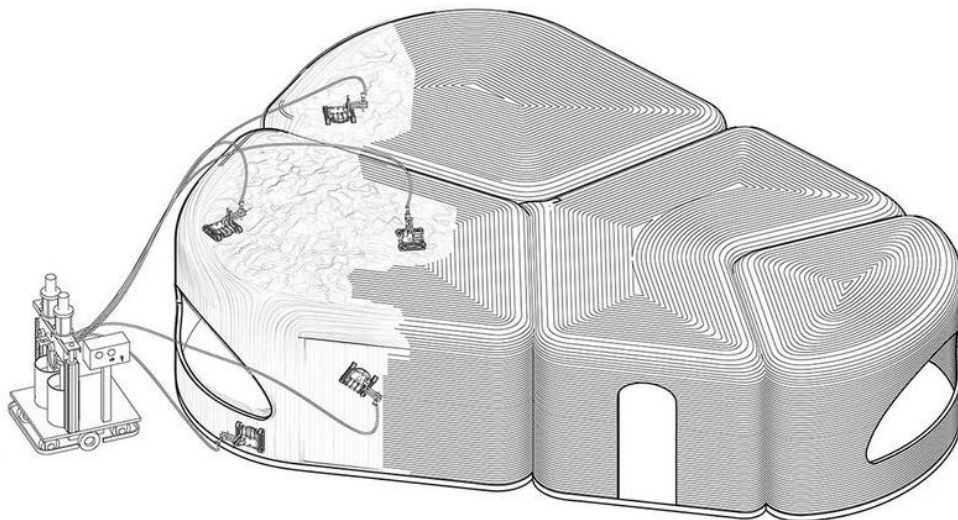


Figura 38 – Demonstração da função desempenhada pelo Robô Vácuo [63]



Figura 39 – Sequência dos três robôs a operar, em ensaio experimental [63]

### 3.2.6 DUS ARCHITECTS – 3D PRINT CANAL HOUSE

A DUS Architects é uma empresa holandesa, originária de Amesterdão. A sua incursão no campo da Impressão 3D ocorreu por intermédio do projeto 3D Print Canal House. Assumiram o projeto simbólico de imprimir uma casa junto à margem de um canal em Amesterdão. Para isso estabeleceram uma parceria com a empresa Ultimaker Ltd para adaptação de uma das suas impressoras 3D. Assim surgiu a Kamermaker (Criadora de Quartos se traduzida à letra), uma máquina que consegue imprimir um volume máximo de 1,8x1,8x3m e está inserida numa espécie de caixa metálica que permite transportá-la facilmente. São dimensões consideráveis quando comparadas com uma impressora 3D convencional, mas, no entanto, insuficientes para as necessidades na área da construção. Isto implica que vários elementos tenham de ser impressos e depois montados até formarem a estrutura pretendida. Esta impressora, que usa um processo de impressão extrusivo (semelhante ao FDM) também tem a particularidade de só imprimir materiais termoplásticos ou misturas à base destes. São materiais pouco utilizados pela indústria da construção, principalmente a nível estrutural, o que implica a realização contínua de vários teste e ensaios para avaliar as suas características. É particularmente importante conhecer as suas propriedades térmicas – uma baixa temperatura de fusão pode acarretar problemas em

situação de incêndio ou forte incidência de radiação solar – e os efeitos que a temperatura poderá provocar a nível mecânico. [64], [65]



Figura 40 – Kamermaker [66]

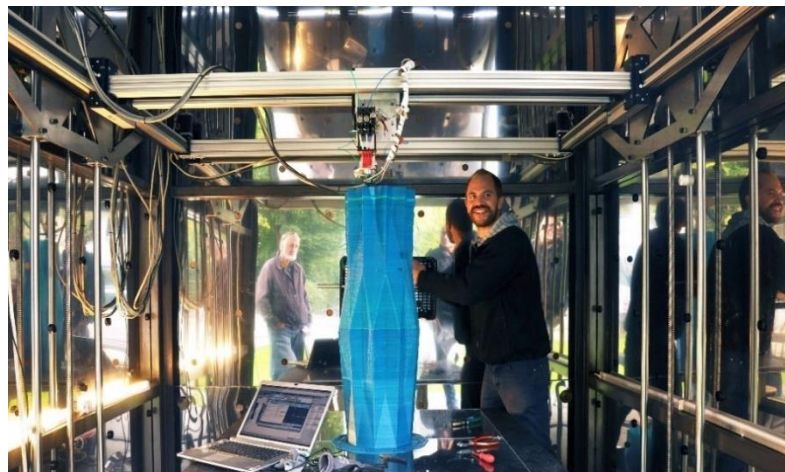


Figura 41 – Interior da Kamermaker, com uma peça experimental a ser desenvolvida [67]

Quanto ao processo de construção em si, é possível compreender pelo nome atribuído à empresa, os seus princípios de construção modular. Devido às características experimentais do projeto, pretende-se imprimir os quartos com a maior diversidade possível de formas e dimensões, criando assim um enorme espectro de configurações possíveis, que se irá tornando mais definido à medida que a construção for avançando. A nível estrutural é fundamental que cada quarto (uma vez que o edifício é construído nessa perspetiva modular) seja capaz de individualmente transmitir as cargas a que está sujeito para a base ou

fundação. É igualmente importante que os quartos funcionem de forma integrada entre si e permitam que o edifício, como um todo, seja também capaz de transmitir as cargas atuantes sobre ele para a base ou fundação do edifício. [68]

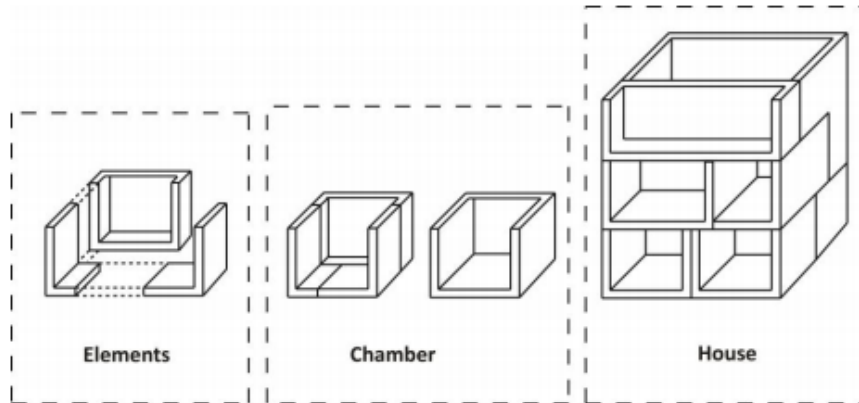


Figura 42 – Constituição do edifício [68]

Este modelo também oferece vantagens numa situação de produção dos módulos em fábrica, uma vez que o seu transporte, montagem e posterior desmantelamento (quando for necessário) é feito de forma relativamente fácil.

O material usado para impressão é um bioplástico reduzido a pó – desenvolvido em conjunto com a empresa alemã Henkel – denominado Macromelt e é composto em 80% por óleo vegetal. A sua temperatura de fusão são 170° Celsius – que é uma temperatura relativamente baixa neste tipo de processos – e depois de solidificar revela-se firme e estável.

A geometria das paredes de fachada contempla diversos espaços diagonais que devem depois ser preenchidos por uma espuma muito leve de um eco betão desenvolvido pela própria DUS, que irá conferir resistência e estabilidade à estrutura. O betão ficará com bastante ar, que terá o efeito de isolante térmico. Nem todos os espaços têm de ser cobertos por betão, isso deverá ser feito de forma otimizada, de maneira a maximizar a força e estabilidade da estrutura requerendo o menor peso possível.

A empresa ainda tem o objetivo de ao longo do processo construtivo desenvolver um modelo computacional no qual arquitetura, material e estrutura estão interligados de tal forma, que quando se alterar algum parâmetro em alguma dessas componentes, as consequências nos restantes sejam imediatamente visíveis. [69]



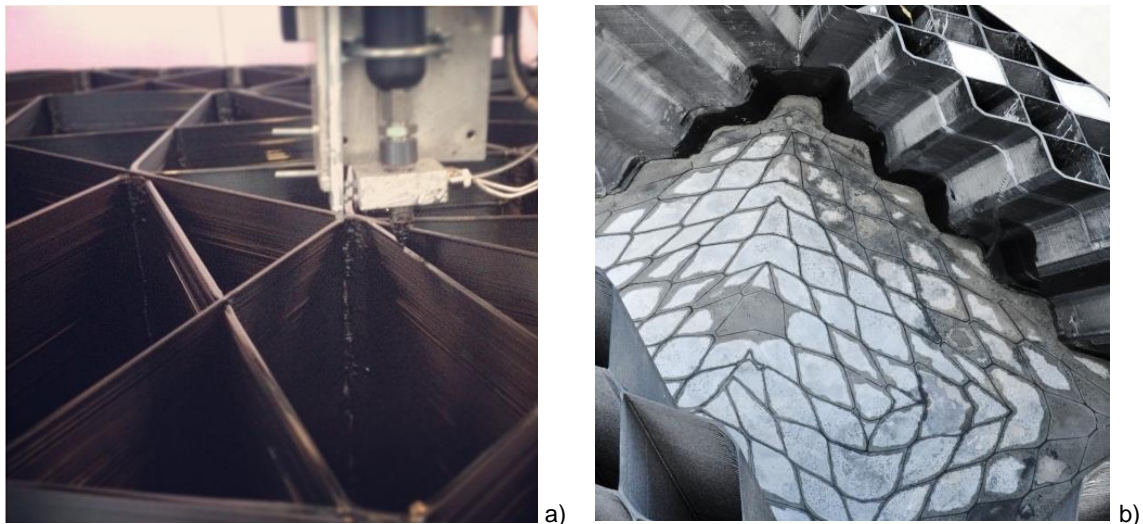


Figura 43 – a) Troço de parede [70], b) Troço de parede já preenchido por eco betão [69]

### 3.2.7 WASP

A italiana WASP, acrónimo de World's Advanced Saving Project, é como o próprio nome indica uma empresa com carácter humanitário e princípios ambientais de ecologia e sustentabilidade. A sua ambição é conseguir criar casas em zonas pobres, densamente povoadas, ou devastadas por catástrofes naturais, que impliquem baixos custos, consumo energético e poluição ambiental. Nesse sentido desenvolveram a Big Delta, que é, com 12m de altura a maior impressora 3D desenvolvida até ao momento na área da construção. O seu método de funcionamento assemelha-se, com um natural aumento de escala, ao processo de extrusão de filamentos (FDM). O objetivo da WASP é realizar edifícios no local, e que a totalidade dos materiais empregados sejam daí extraídos. O material base deve ser formado por uma mistura de água, solo e fibras naturais. A Big Delta pode imprimir compostos à base de:

- argila;
- misturas à base de cal;
- serradura (resíduos de madeira);
- poliestireno;
- cimento (apesar de ser indesejável).

Uma casa executada a partir de elementos naturais demora mais tempo a ser completada, porque o período de endurecimento de cada camada – fundamental para garantir a resistência necessária para suportar a próxima – é maior (as características climáticas locais também têm grande influência neste processo). No entanto estas, em geral, requerem menos cuidados de manutenção.

Durante o processo de execução da edificação podem-se contemplar aberturas para portas, janelas, bem como redes elétrica e hidrosanitária. A Big Delta está preparada para operar em zonas inóspitas, sem rede elétrica, gerando toda a energia que precisa a partir de um único painel solar incorporado que consome entre 1 e 1,5 kilowatt.

No entanto as grandes dimensões também podem acarretar desvantagens, nomeadamente em relação ao transporte e montagem, que se tornam mais difíceis e podem aumentar os custos iniciais da construção. [71], [72]

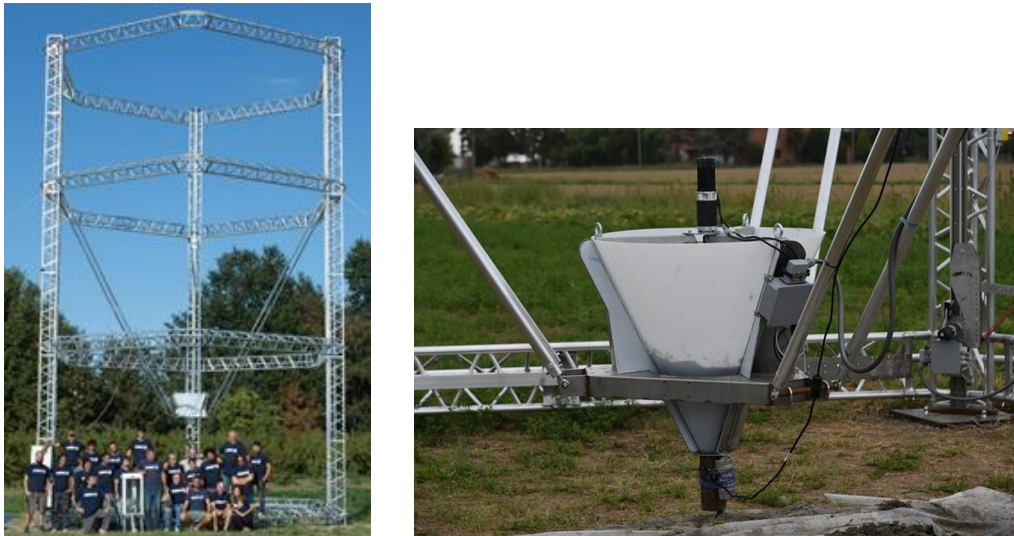


Figura 44 – Big Delta e pormenor da cabeça de extrusão [73], [74]



Figura 45 – Elemento experimental produzido à base de argila [75]

### 3.2.8 APIS COR

A impressora Apis Cor, que se encontra ainda numa fase de protótipo, foi criada pelo jovem engenheiro russo Nikita Chen-iun-tai. Consiste num braço robótico, com uma estrutura similar à de uma grua, apoiada numa base giratória. O braço, que é extensível e retrátil, tem um comprimento base de 5,5m e uma largura de 1m. A altura da versão atual são 1,5m, extensíveis até um máximo de 3,1m, mas com possibilidade de aumento futuro para virtualmente qualquer altura. Estas dimensões combinadas com os movimentos translacional e giratório proporcionados, pelo braço e pela base, respetivamente, formam um painel máximo de impressão de 192m<sup>2</sup> (100m<sup>2</sup> efetivos por dia). O seu peso são 2,4 toneladas. Devido à sua compacidade, é facilmente transportável por meio um veículo tradicionalmente usado no setor. A montagem do equipamento também se prevê ser rápida, devendo durar no máximo meia hora. [76]



Figura 46 – Apis Cor [77]



Figura 47 – Apis Cor: transporte acessível [78]

O material de impressão previsto é um composto criado pela empresa, à base de betão reforçado com fibra (não são conhecidos dados sobre o tipo de fibra), que será propulsionado por uma bomba auxiliar ligada à impressora e extrudido pela cabeça desta. Todo o processo é efetuado com baixo consumo energético uma vez que a máquina apenas requer cerca de 8 kilowatts para funcionar. A impressora, ao contrário da maioria das outras que têm vindo a ser desenvolvidas, é posicionada (virtualmente) no interior, realizando a impressão de dentro para fora. [78]

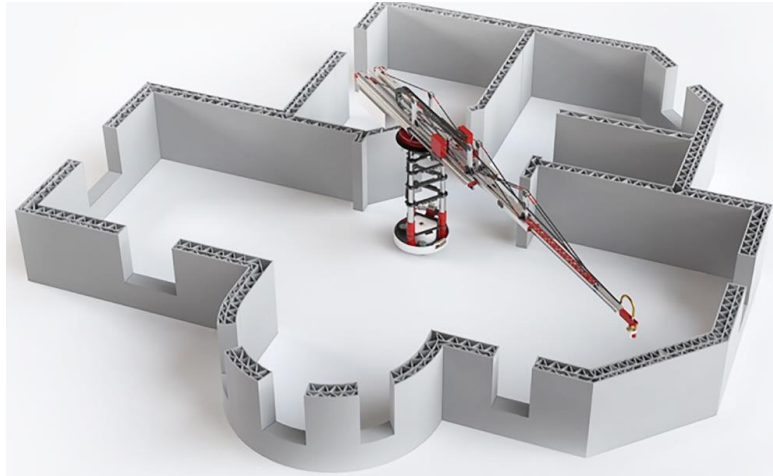


Figura 48 – Processo de construção [79]



Figura 49 – Troço de parede teste, com janela integrada [80]

A impressora, nesta fase, é dirigida para a construção de habitações com poucos pisos.

### 3.2.9 MX3D

A MX3D é uma startup holandesa, fundada pelo jovem designer Joris Laarman. A empresa dedica-se a explorar os potenciais do processo de fabrico aditivo, quando aplicado à construção. Atualmente a firma está focada na concretização de um projeto simbólico (um pouco à semelhança do que a DUS Architects tem vindo a desenvolver), em Amesterdão, que consiste na construção de uma ponte metálica que una duas margens de um dos muitos canais caraterísticos da cidade. Para isso, adaptaram um braço metálico de 6 eixos, usado normalmente na indústria automóvel. Os materiais para impressão que a empresa tem vindo a desenvolver são compostos fundamentalmente à base de metais como:

- aço;
- aço-inoxidável;

- alumínio;
- bronze;
- cobre.

O braço mover-se-á através da estrutura que for construindo, não implicando dessa forma a necessidade de estruturas de apoio auxiliares. A capacidade do aparelho de projetar metal fundido em pequenas quantidades de cada vez em conjunto com as características dos aditivos acrescentados à base metálica, permitem um processo de endurecimento muito rápido, conseguindo assim anular o efeito da gravidade. As camadas vão sendo ligadas entre si, e para que esse processo ocorra da melhor forma, a última camada é ligeiramente fundida, para que a seguinte possa aderir perfeitamente. De acordo com testes conduzidos pela empresa, o metal produzido desta forma é 90% tão forte como metal obtido por métodos tradicionais. [81], [82]

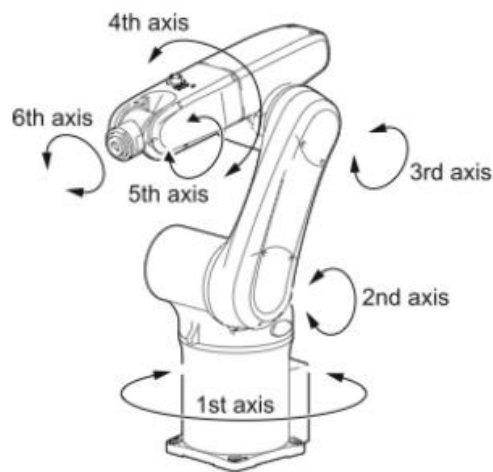


Figura 50 – Modelo de um braço robótico de 6 eixos [83]



Figura 51 – Braço robótico e detalhe do processo de fabrico [84]



Figura 52 – Modelo digital da ponte que se pretende executar [84]

### 3.2.10 D-SHAPE

A D-Shape é um projeto criado pelo engenheiro civil e inventor italiano Enrico Dini, com o propósito de conceber uma máquina (homónima), capaz de produzir elementos arquitetónicos empregando métodos aditivos.

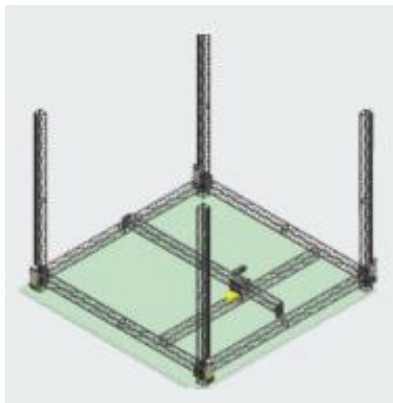


Figura 53 – Idealização da D-Shape [85]

#### **Dimensões:**

A estrutura de suporte da impressora – à base de alumínio – é constituída por uma moldura horizontal quadrangular, de dimensões 7,5x7,5m, assente em quatro colunas que podem ter uma altura variável entre 3 e 18m (esta variação pode ocorrer em segmentos de 3m). A área efetiva de impressão é uma janela de 6x6m. Com as presentes dimensões, a D-Shape destina-se a edificações de 1 a 2 andares, preferencialmente com custo de execução baixo e aplicação de materiais ambientalmente sustentáveis.

A estrutura horizontal pode deslocar-se ao longo das colunas e nela estão assentes duas barras paralelas entre si, responsáveis pelo suporte da cabeça de impressão. É também ao longo destas que ela se desloca. O peso global do sistema, incluindo equipamento de alimentação são 5000kg. Se não for considerado este tipo de equipamento o peso será de 1300kg.

Devido às suas dimensões ligeiras (quando comparada com elementos como guias) pode ser facilmente transportada e montada/desmontada por dois homens em apenas algumas horas.

**Material:**

O processo aditivo aplicado pela D-Shape assemelha-se ao Binder Jetting (BJ), ou seja, implica matéria-prima granular e um agente aglomerante.

A matéria-prima base é areia (mais usada) ou cascalho – terão de se inserir num intervalo granulométrico de 0,01mm a 65mm – e são sempre reduzidos a pó antes de serem aplicados. A este material granular adiciona-se óxido de magnésio (MgO), para que não seja inerte, e também possa intervir ativamente na reação química. Este procedimento contribui para a resistência à tração da estrutura final, o que evita a necessidade de armadura de ferro. Pode-se ainda considerar a inclusão de fibras de reforço – de vidro, carbono ou nylon – para suprimir uma possível baixa resistência à tração do ligante ou um eventual baixo módulo de elasticidade.

O elemento aglutinante é um composto inorgânico líquido, de baixa viscosidade, desenvolvido à base de cloreto de magnésio (MgCl<sub>2</sub>).

**Processo:**

Informações complementares:

- a cabeça de impressão possui 300 bocas de ejeção, espaçadas entre si 20mm;
- a espessura das camadas pode variar entre 5 e 60mm;
- a velocidade da cabeça de impressão pode variar entre 0 e 500mm/s, e é condicionada pelo material e pela frequência de deposição do aglutinante;
- consumo energético: 2 kW (máximo), sem equipamento de alimentação; 40 kW (máximo), com equipamento de alimentação;
- contempla a execução de paredes internas e externas, colunas, escadas, superfície côncavas e convexas e também assegura a realização de orifícios para cabos elétricos e tubagens;

O processo decorre ao longo de uma sessão ininterrupta. É depositada sobre a base uma camada (com a espessura pretendida, dentro do intervalo possível) composta pelo material granular e óxido de magnésio. Esta camada é depois compactada por ação de um conjunto de roletes.

De seguida, a cabeça de impressão projeta o ligante segundo a configuração transversal definida computacionalmente para cada camada. Devido ao espaçamento entre as bocas poderão surgir espaços por preencher. Por esse motivo, a cabeça de impressão roda e repete o procedimento na direção perpendicular. Este processo tem de ser repetido quatro vezes até a impressão de cada camada ficar concluída. Quando os materiais entrarem em contato, inicia-se a reação química e por consequência o processo de endurecimento, que leva 24h a ser totalmente concluído. Este processo repete-se até que o elemento pretendido seja completado.

Durante o processo, como no Binder Jetting, o material não consolidado funciona como suporte para a restante estrutura. No final pode ser recolhido – parte através de um sistema de filtragem instalado na zona inferior, o restante por ação manual, com recurso a pás – e reutilizado.

Enrico Dini estima que o processo seja 4 vezes mais rápido do que métodos tradicionais e que apesar de o ligante ser mais caro do que cimento Portland, a realização seja globalmente entre 30% a 50% mais barata. [85], [86]



Figura 54 – D-Shape em ambiente laboratorial [87], [88]

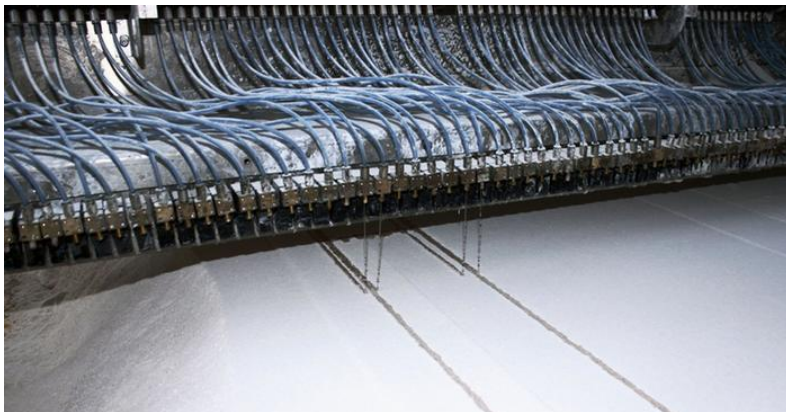


Figura 55 – Detalhe da cabeça de impressão e múltiplas bocas [89]





Figura 56 – Radiolaria: estrutura executada pela D-Shape, que ilustra a liberdade de forma alcançável [90]

À medida que foi desenvolvendo e testando a tecnologia, Enrico Dini percebeu as potencialidades da sua máquina para a formação de uma vertente arquitetónica mais naturalista e orgânica, algo que ele designou como *Archinature*. A partir desse conceito, encetou o seu mais recente projeto, que consiste no desenvolvimento e produção de réplicas a grande escala de recifes corais e fundos marinhos, essenciais na proteção contra a erosão costeira e para restauração de habitat natural. Dini defende que é um projeto de “0 km e baixa pegada de carbono”, uma vez que o objetivo é extrair a areia e o aglutinante (que será formado a partir de água marinha) precisamente do local no qual se pretende implantar a estrutura. Para desenhar estes elementos, Dini recorreu a um avançado software CAD capaz de produzir formas harmónicas otimizadas, baseadas na sequência de Fibonacci. [91]

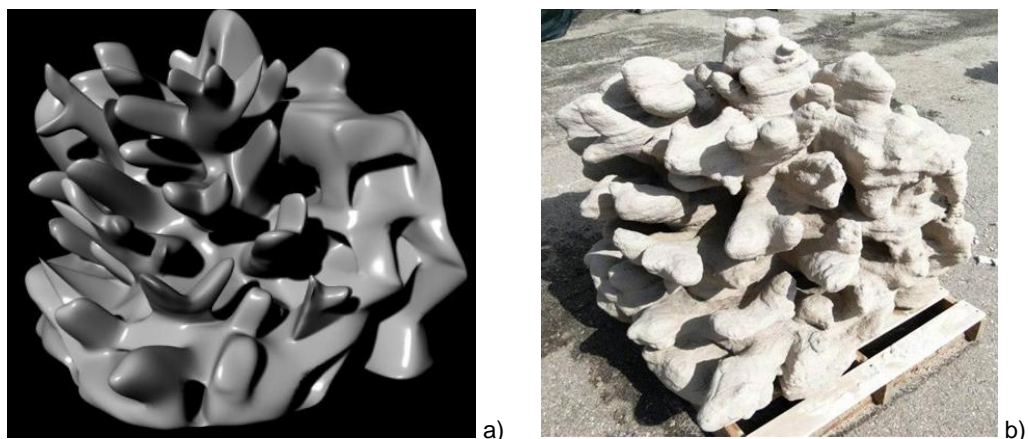


Figura 57 – Recife artificial: a) modelo virtual 3D [92], b) já materializado [93]

Outras potenciais aplicações para esta tecnologia são [94]:

- estruturas urbanas auxiliares como paragens de autocarro, bancos de parques ou jardins, quiosques e pavimentos;

- elementos arquitetónicos decorativos como arcos, colunas, estátuas ou fontes;
- a nível arqueológico, na criação de partes em falta de elementos como, por exemplo, colunas;
- cópia à escala de qualquer edifício existente;
- a nível de engenharia: troços de pontes ou estradas, secções de tubos, porções de pilares, secções de portos, vigas e colunas de secção variável.

### 3.2.11 WINSUN

A Winsun é uma empresa chinesa, com origem em Xangai, que se dedica ao desenvolvimento de novos materiais e técnicas de construção. É das empresas que mais avanços concretos efetuou a nível da implementação da tecnologia de Impressão 3D na área, tendo já impresso 10 pequenas casas no excecional intervalo de 24h, e ainda uma mansão de 1100m<sup>2</sup> e um edifício de 5 andares (o mais alto já impresso até ao momento). Para obter estes resultados, a empresa criou um sistema de impressão formado por um braço robótico de 6,6m de comprimento, que está assente numa barra horizontal de 10m de largura, que por sua vez está instalada em dois carris através dos quais se pode deslocar ao longo de uma profundidade máxima de 40m. [96]



Figura 58 – Impressora 3D desenvolvida pela Winsun [95]

O material de impressão, também desenvolvido pela empresa, é constituído à base de:

- cimento,
- fibras de vidro,
- Crazy Magic Stone, que é um composto criado pela empresa, formado por uma mistura de sílica ou silicatos com uma fibra e um aditivo ecológico nanométrico, não especificados.
- agentes endurecedores,
- resíduos reciclados, provenientes de construções executadas de forma tradicional, demolições, mas também de outras indústrias e até atividades mineiras.

A empresa optou até agora por um modelo de construção modular. Esses módulos são executados numa fábrica da empresa, equipada com uma espécie de linha de montagem de Impressão 3D que pode ser

operada por até um máximo de quatro impressoras em simultâneo. Os elementos podem conter um padrão diagonal de reforço no interior, que pode permitir a passagem de cabos e condutas, mas que também, devido aos espaços de ar interiores, pode assumir as funções de isolante térmico. Pode ainda contemplar o reforço das componentes por meio de armaduras de ferro. Aberturas para portas e janelas também serão consideradas durante a fabricação. [96], [97]

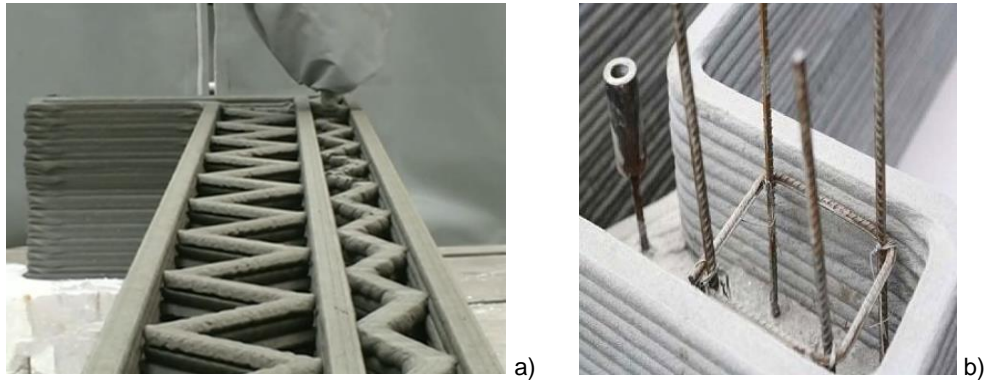


Figura 59 – a) Reforço com padrão diagonal [98], b) Reforço com armadura metálica [99]

Estas secções são depois transportadas para o local de implementação, no qual serão montadas entre si até constituírem o edifício final.



Figura 60 – Sequência de montagem até à obtenção de uma das dez casas construídas pela empresa em 24h [96]

Devido à qualidade ainda pouco conseguida da superfície final das paredes, com pouca uniformidade entre as camadas, a empresa, em algumas situações, recorreu à colocação de painéis de revestimento (que podem ser formados por diversos materiais).



Figura 61 – Exemplo de revestimento com painéis [97]

Revestimentos, lajes, coberturas, bem como elementos e instalações básicas de funcionamento de um edifício, terão de ser efetuados de forma complementar, pelos meios habituais.

Com a aplicação destas técnicas, a empresa prevê que num futuro próximo, seja possível poupar, em relação a uma construção efetuada por métodos tradicionais, 60% em materiais, 70% em tempo de execução e 80% em mão de obra.

### 3.2.12 CONTOUR CRAFTING

O método Contour Crafting (CC, a sua tradução será algo como contorno artesanal) tem vindo a ser desenvolvido há vários anos na USC (University of Southern California), por uma equipa liderada pelo Dr. Behrokh Khoshnevis. Apesar de ser um dos projetos mais antigos em desenvolvimento, não existem imagens divulgadas referentes à impressora (tanto versão final como teste), nem dados sobre as suas dimensões.

O CC é um método misto que combina um processo extrusivo para formar as superfícies externas do objeto (os ditos contornos que originaram a sua designação) e um processo de preenchimento (por vazamento ou injeção) para construir o núcleo do objeto. Os contornos formados assumem assim uma função de modelagem, à semelhança da desempenhada pelas cofragens, mas com caráter definitivo. As características do material a ser depositado no interior são fundamentais, pois é ele que irá suportar a estrutura.

A boca de extrusão possui vários orifícios, um em cada extremidade para realizar o contorno do objeto, e as restantes, mais internas, para preencher o seu interior. Esta característica permite que materiais diferentes possam ser co-extrudidos, por exemplo, plástico nos contornos exteriores e betão no núcleo. Cada orifício lateral possui duas espátulas, uma no topo, e uma lateral, que têm a função de aplanar o material à medida que vai sendo extrudido, deixando as camadas lisas (é um aspeto diferenciador em relação a outras tecnologias). As espátulas laterais podem ser inclinadas de forma a criar superfícies não

ortogonais. A qualidade da superfície é ditada pelo trabalho das espátulas e não da boca de extrusão, e é tão boa que no final pode ser imediatamente pintada sem necessidade de tratamento extra. [100], [101]

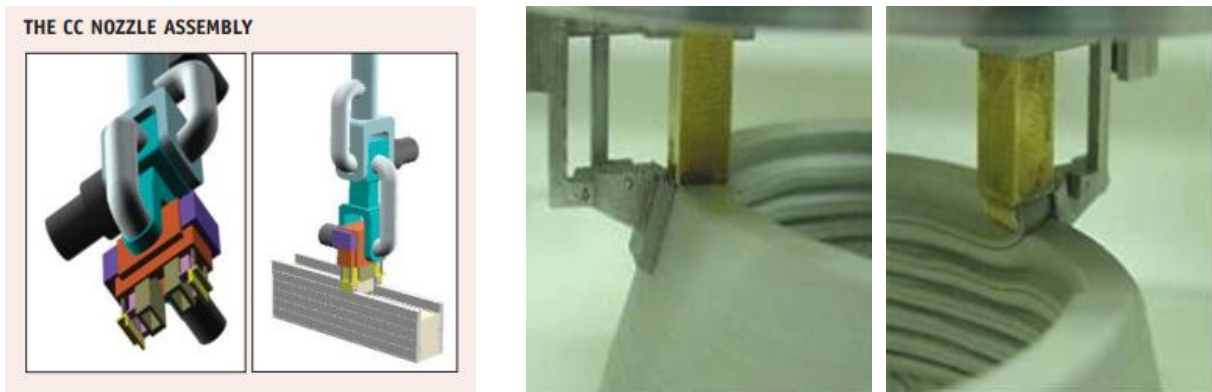


Figura 62 – Representação da boca de extrusão [101], [102]

A cabeça de impressão está integrada num braço robótico, que por sua vez está instalado num sistema de grua-pórtico XYZ. Nessa estrutura podem ainda estar apoiados outros braços robóticos, destinados a executar outras funções. Esse sistema desloca-se ao longo de dois carris paralelos, instalados no local de implementação da obra. A construção decorrerá na área interior a estes.



Figura 63 – Esquematização do sistema grua-pórtico [103]

Apesar de o processo em si estar bem estruturado, existem poucas informações divulgadas acerca dos materiais que podem ser impressos. No entanto sabe-se que o material de contorno habitualmente usado nos testes experimentais é uma argamassa cimentícia e que o material de preenchimento (responsável pela resistência e estabilidade) é muito similar a betão. No entanto prevê-se que a impressora possa imprimir a partir de outros materiais.

Vários materiais que reajam quimicamente entre si podem ser encaminhados em simultâneo para a cabeça de impressão, misturando-se na barreira desta, imediatamente antes de serem descarregados. Ou seja, a mistura não tem de ser necessariamente realizada previamente. [100], [101]

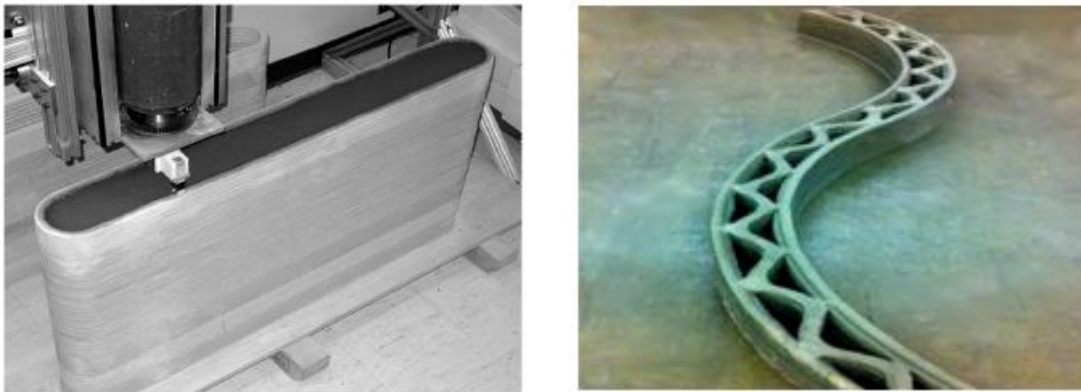


Figura 64 – Elementos experimentais produzidos por CC [101], [104]

O processo pode ainda assegurar de forma automatizada, através de braços robóticos adjacentes, a execução das seguintes tarefas complementares [100]:

**Reforço:**

É possível considerar o reforço da estrutura com malha de aço, que seria efetuada através da inserção de vários elementos modulares promovida por um braço robótico. Como alternativa ao tradicional reforço com metal, poderiam ser usados, por exemplo, plásticos reforçados com fibra (Fiber Reinforced Plastics, FRP), que seriam ejetados diretamente pela boca de extrusão.

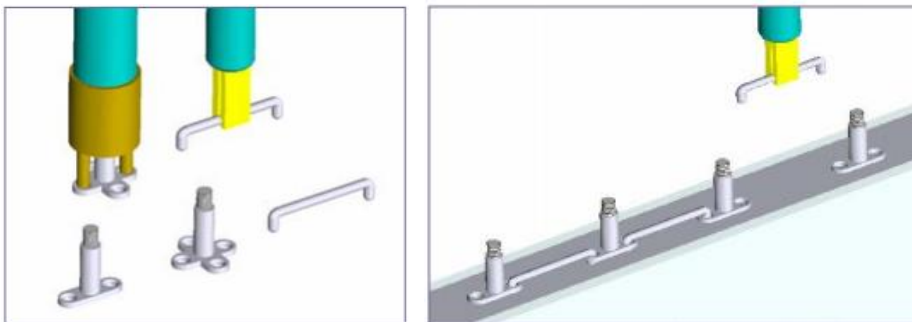


Figura 65 – Exemplificação da inserção automática de segmentos de armadura [100]

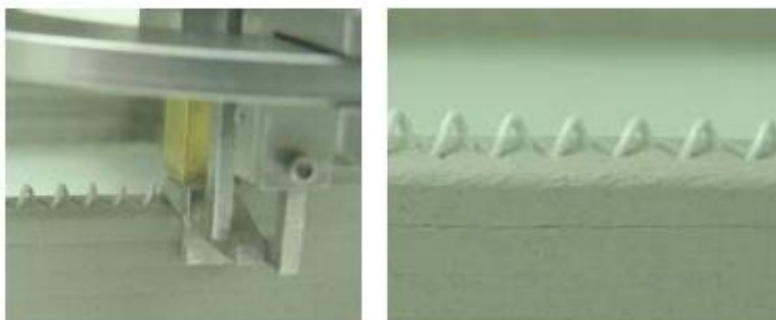


Figura 66 – Reforço automático de FRP [105]

### Revestimento de paredes e pavimentos por ladrilhos:

Um braço robótico espalha um material aderente nas paredes ou pavimentos. Outro braço é responsável por colher o ladrilho, transportá-lo e instalá-lo sobre a área previamente coberta pelo adesivo.

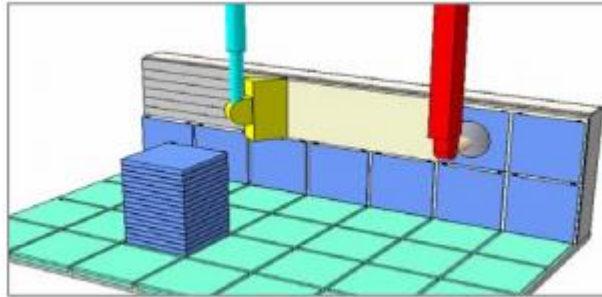


Figura 67 – Exemplificação de revestimento automático [100]

### Rede hidráulica:

As tubagens, independentemente do material constituinte, são fracionadas e cada um desses segmentos vai sendo associado ao segmento anteriormente instalado, através da conduta que foi deliberadamente executada pela máquina para esta finalidade. O anel vermelho que se pode observar na Figura 68 é responsável pela fundição entre os dois troços de conduta.

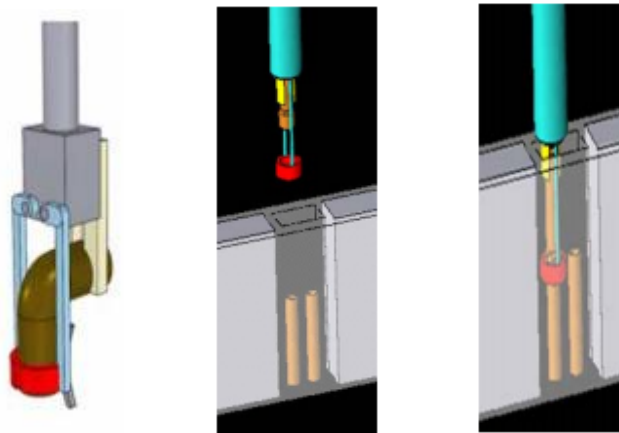


Figura 68 – Exemplificação da instalação automática da rede hidráulica [100]

### Rede elétrica:

Para instalação da rede elétrica, recorre-se a segmentos condutivos para energia e linhas de comunicação, integrados em materiais não condutivos, como polímeros. Esses módulos podem ser transportados e montados por um braço robótico com uma extremidade em formato de pinça. No entanto, este procedimento ao contrário dos anteriores, tem uma componente manual, que consiste, como pode ser compreendido pela Figura 69 b) na instalação de elementos como tomadas, através das aberturas das paredes.

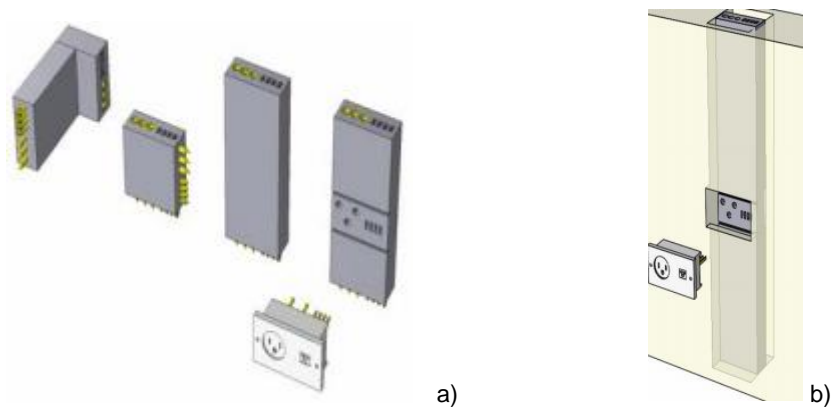


Figura 69 – Exemplificação da instalação da rede elétrica [100]

## Pintura

Como já foi anteriormente referido, a superfície da parede fica com uma qualidade que lhe permite ser pintada sem qualquer tipo de tratamento adicional. Este processo também pode decorrer de forma automatizada. Um aspersor de spray, robótico, pode pintar cada parede de acordo com as preferências desejadas. O sistema pode conter uma boca de spray ou uma cabeça de injeção.

## 3.3 ANÁLISE

### 3.3.1 DÚVIDAS

Algumas informações fundamentais sobre alguns projetos são ainda desconhecidas, ou não estão suficientemente desenvolvidas, o que causa limitações em qualquer tentativa de análise. Entre estas lacunas, que devem ser exploradas no futuro, encontram-se:

- Poucas referências relativamente ao sistema de alimentação das impressoras: forma de funcionamento, equipamento, sistema de bombagem e ligações entre este e a impressora. Por exemplo, no caso do CC, que usa extensivamente betão, pode-se imaginar a possibilidade de ser um camião-betoneira semelhante aos convencionalmente usados. É importante compreender, no caso de impressão a partir de material granular, como funcionam os equipamentos de moagem de rocha, se não implicam um grande consumo energético e se conseguem produzir quantidades significativas num espaço de tempo não muito alargado.
- Poucas informações relativas às exigências e custos de elaboração do projeto digital.
- A velocidade de execução, uma das bandeiras da tecnologia, ainda não foi confirmada de forma explícita e satisfatória.
- Ainda não existem dados concretos que permitam avaliar o preço global de construção e confrontá-lo com os preços estabelecidos por métodos tradicionais.
- Falta de esclarecimento em relação aos procedimentos de ligação entre elementos estruturais impressos tridimensionalmente e outros elementos e ainda em relação à forma como serão efetuadas as instalações básicas complementares.
- Poucos dados relativamente à composição e propriedades dos materiais, bem como ao seu desempenho quando submetidos a ensaios. É também importante conhecer o comportamento deste tipo de estruturas, quando sujeitas a ações sísmicas ou a incêndios.



- A construção tradicional é feita com vários materiais, tendo cada um normalmente uma função específica (isolamento térmico, reforço da resistência à tração). É preciso compreender, se a partir de um conjunto consideravelmente mais reduzido de materiais, a satisfação das mesmas funções pode ser garantida.
- É relevante perceber, em situações de fabricação in-situ, de que forma as condições exteriores, particularmente atmosféricas, podem influenciar o processo e que medidas podem ser tomadas para mitigar estes efeitos.
- As estruturas, na generalidade dos casos, dispensam o sistema viga-pilar, passando as próprias paredes a assumir uma função estrutural de suporte, apoiando o peso das lajes e pavimentos superiores. É importante perceber as alterações e novas abordagens que esta característica exigirá a nível do cálculo estrutural. Relativamente às paredes interiores, é importante perceber se também terão de exercer uma função estrutural ou se por outro é possível libertá-las dessas funções, e permitir que acompanhem a atual tendência crescente no setor, de divisórias interiores elaboradas à base de materiais de fácil desmantelamento, que permitam alterações ou adaptações no interior da habitação.
- Poucas referências em relação à comercialização das impressoras e como esta poderá decorrer, bem como ao espectro de valores que poderá assumir. É também importante analisar a possibilidade de alugar equipamento com estas características, e não necessariamente vender, uma vez que esta modalidade implica custos mais elevados, principalmente numa fase ainda inicial, na qual a tecnologia ainda não está completamente implementada.

### 3.3.2 APRECIÇÃO GERAL

Dentro do que é possível saber existem dois processos de Impressão 3D predominantes na área da construção: extrusão (a partir de vários materiais) e a designada cama de pó, ou seja, associação e endurecimento de uma camada de material granular por ação de um agente aglutinante. Em ambos os casos, os materiais endurecem através de um processo de cura, o que é inerentemente menos controlável do que quando este ocorre por ação de calor ou radiação UV (que outros processos mais convencionais de Impressão 3D aplicam).

A nível de construção podem-se distinguir dois grupos: produzido em fábrica (pré-fabricado, portanto) ou produzido no local. Em ambos se pode implementar uma filosofia modular. A nível de pré-fabricação, podem-se desenvolver peças ou elementos específicos, ou ainda módulos, que podem constituir uma parte ou a totalidade da edificação, e que terão de ser transportados e montados no local. Se a construção for efetuada no local, pode decorrer de duas formas: uma impressora de grandes dimensões executa integralmente o projeto, ou uma impressora mais pequena constrói módulos, ou frações modulares, que depois serão montados.

Relativamente às iniciativas com pretensões de construir integralmente a edificação, com exceção da D-Shape, todas criam numa primeira fase o contorno, sendo o interior (que normalmente é reforçado com um elemento estrutural com geometria diagonal) posteriormente preenchido por um material com melhores propriedades, que irá conferir estabilidade e resistência à estrutura. Os espaços interiores – que devido à quantidade de ar que acomodam desempenham, em parte, uma função de isolante térmico – não necessitam de ser todos preenchidos, podendo este processo ser efetuado de uma forma eficiente, que permita, assegurando sempre a necessária estabilidade estrutural, minimizar a quantidade de material utilizado e consequentemente produzir uma estrutura mais leve e com menores custos associados. Em caso de pré-fabricação de módulos com estas características, o procedimento mais

eficiente será produzir os contornos dos elementos, efetuar o transporte para a obra e respetiva montagem, e apenas preencher os espaços vazios quando o módulo se encontrar devidamente instalado na posição prevista.

O presente estado da tecnologia abre uma multiplicidade de possibilidades e combinações que é necessário aprofundar.

A nível de impressoras de grande dimensão, a Apis Cor parece ter alguma vantagem, pelo menos em relação à D-Shape, uma vez que não se conhecem detalhes acerca da impressora responsável pelo CC, por ser retraível e mais facilmente transportável, sem ter necessidade de montada e desmontada.

Uma das tecnologias mais promissoras são os Mini-Builders, desenvolvidos pela IAAC – que são também destinados à construção de infraestruturas completas – devido à sua pequena dimensão – que poderá variar no futuro para enfrentar desafios de maior escala – que poderá oferecer vantagens a nível de transporte, arrumação, logística e até mesmo reparação ou substituição em caso de avaria. No entanto, como opera em equipas de vários elementos, a sua coordenação e supervisão poderá ser mais difícil.

O sistema da Brach Technology, pode permitir um modelo de negócio semelhante ao de outra empresa proeminente na área da Impressão 3D: a Shapeways. Esta recebe modelos virtuais de clientes, executa-os nas suas fábricas e envia os objetos já materializados. Da mesma forma, a Branch pode receber um ficheiro com a representação de um determinado elemento, imprimir uma armadura ou vários segmentos de armadura adequados (eventualmente calculá-la se a empresa que encomenda assim o requerer) e enviar o produto que depois será instalado na obra. Isto elimina a necessidade de as empresas possuírem impressoras próprias, o que é particularmente útil quando só necessitam de recorrer às suas capacidades em situações esporádicas.

Na indústria da construção ocidental, os projetos com maior potencial de adoção num horizonte próximo são os que não implicam grandes alterações aos paradigmas atualmente vigentes, como os de criação de peças ou elementos estruturais otimizados de acordo com a finalidade pretendida. Também o conceito de matriz estrutural que a Branch Technology desenvolveu pode ser interessante, uma vez que facilita a construção de formas mais intrincadas, recorrendo na mesma a materiais tradicionalmente empregues. No entanto a construção destas estruturas em fábrica e posterior transporte, numa perspetiva global não parece ser a melhor solução (apesar da sua leveza). Teriam de considerar a expansão para pontos estratégicos a partir dos quais fosse viável o abastecimento a clientes, ou de alguma forma, conseguirem produzir no local.

Um dos grandes objetivos, comuns a praticamente todos os impulsionadores destes projetos, é a vontade de contribuir para a supressão de alguns problemas socioeconómicos e humanitários. Problemas que foram referidos na introdução, como a urbanização desenfreada, habitação precária, e a grande percentagem de pessoas sem habitação por consequência de migração forçada ou destruição provocada por causas naturais. Neste campo parece também já existir algum potencial para aplicação a curto prazo. Nestes casos, Enrico Dini, que já recebeu contactos por parte de dirigentes políticos de Pretória, África do Sul, para o desenvolvimento de um empreendimento suburbano, alerta que numa perspetiva de integração social, não se devem construir apenas algumas casas recorrendo a esta tecnologia, mas planificar e estruturar a construção de blocos ou bairros completos, numa perspetiva comunitária [106].

No entanto, este meio tecnológico, nesta fase, apesar de algumas vantagens manifestas ainda não consegue ser competitivo em relação aos métodos e materiais convencionalmente aplicados na construção. A complementaridade entre recursos tradicionais e tecnologias aditivas, deverá ser a possibilidade mais forte de implementação da tecnologia a curto/médio prazo. E mesmo numa perspetiva mais alargada, nas indústrias mais proeminentes, é difícil imaginar a substituição total do modelo

construtivo de uma forma instantânea. Se esta absorção radical da tecnologia se verificar, esse fenómeno deverá ocorrer em casos urgentes, de grande necessidade, como os referidos no parágrafo anterior. A forma mais fácil de integrar a tecnologia poderá ser através de uma introdução gradual, em que as tarefas de execução são adequadamente compartilhadas, acabando esta por ir conquistando protagonismo e cimentando o seu espaço.

É importante perceber que normalmente, apenas as vantagens deste tipo de processo são publicitadas, faltando perceber também as consequências ou implicações menos positivas. É necessário analisar com detalhe e numa perspetiva abrangente o impacto que estes processos poderão ter em todas as fases de construção.

### 3.3.3 VANTAGENS

Há aspetos que podem ser inferidos de imediato e outros que podem apenas ser deduzidos ou pressupostos.

#### 3.3.3.1 Efetivas

- Flexibilidade de design e liberdade de forma, algo muito constringido pelos métodos de construção tradicionais.
- Redução de custos na execução de projetos complexos. Para além de tornar mais fácil a sua realização, também promove uma redução de custos em relação aos métodos tradicionalmente aplicados, em grande parte por não ter necessidade de recorrer a estruturas auxiliares.
- Tendência para utilizar apenas o material estritamente requerido pelo projeto, reduzindo assim o desperdício (e por consequência os custos e poluição ambiental) para valores muito baixos ou teoricamente nulos. Existe uma forte possibilidade de esse material não usado ser reutilizado na fabricação de novas camadas.
- Proporciona a integração de novos materiais na indústria da construção. Materiais formados à base de plástico como os que a Branch Technology e a DUS Architects têm explorado. Materiais formados a partir de matéria-prima extraída do local, portanto praticamente 100% naturais (não totalmente porque receberão adições inevitavelmente), biodegradáveis e obtidos por meio de um processo que provocará baixas emissões de carbono e outros gases poluentes. Materiais reciclados a partir de resíduos gerados pela construção tradicional e por outras indústrias (a exemplo do que a Winsun tem feito).
- A automação permite um trabalho mais preciso e rigoroso em comparação com o falível trabalho humano e reduz a probabilidade de ocorrência de erros.
- A automação de grande parte do processo construtivo permitirá também reduzir riscos de segurança e saúde, ocorrências que fustigam frequentemente o setor, no qual se registam elevadas taxas de acidentes – muitos deles letais – e lesões. Permite também minimizar o contato com materiais e substâncias potencialmente nocivos para a saúde humana. O espetro de novas profissões que poderão surgir deverá trabalhar em ambientes mais seguros, de forma que também aí se reflète este aspeto.
- Redução de custos relacionados com a diminuição de mão de obra (representam, em média, entre 40% a 60% dos custos totais de uma obra).
- Redução de fumos, poeira e barulho incómodo no decorrer da construção, que normalmente incomoda os trabalhadores, mas também moradores e transeuntes das zonas circundantes.

- Polivalência. Dependendo do modelo da impressora, o processo poderá decorrer in-situ ou em fábrica, com um propósito de construção integral, modular, de elementos ou peças.
- Se necessário podem construir ininterruptamente, durante 24h, 7 dias por semana, bastando para isso que sejam continuamente alimentadas energeticamente e com material (o processo deve, no entanto, ser sempre supervisionado).
- Pode permitir a construção em ambientes hostis ou perigosos, não convenientes para uma força de trabalho humana.
- Sabe-se por antecipação o tempo que cada processo demorará a ser efetuado.

#### 3.3.3.2 Potenciais

- Redução global de custos. A redução de custos por decremento da mão de obra e poupança de material é evidente, no entanto, é ainda preciso ter em consideração fatores como o tipo de material usado, equipamento e velocidade de execução.
- Design estrutural otimizado, e por inferência construção mais eficiente e sustentável. Este pode ser conseguido não apenas com recurso a técnicas matemáticas clássicas, mas cada vez mais por meio de uma crescente bio inspiração (o melhor exemplo de harmonia estrutural são os mecanismos naturais) e por avançados algoritmos matemáticos, que permitem gerar elementos harmonizados com base em considerações matemáticas como a sequência de Fibonacci, razão de ouro ( $\phi$ ) ou fractais.
- Menos energia total despendida no decorrer de todas as atividades do processo, tornando-o por isso mais ecológico.
- Redução de transporte de pessoas, materiais e equipamentos e consequente redução de custos e de emissões de CO<sub>2</sub>.
- Redução do tempo de execução. É uma vantagem geralmente aceite, mas ainda pouco demonstrada em termos práticos. Existe a vantagem de poder trabalhar ininterruptamente (ao contrário do que sucede com o ser humano, não pode existir cansaço).
- Pode criar novas competências e empregos – tendencialmente mais tecnológicos – em diversas áreas (arquitetura, engenharia, design gráfico, química).
- Democratização da indústria da construção, abrindo espaço para mulheres e homens mais velhos, sem tanta disponibilidade física para desempenhar as funções antes exigidas. Como afirma Enrico Dini a força física será em grande parte substituída pela força intelectual.

#### 3.3.4 DESVANTAGENS

Praticamente todos os aspetos negativos que a tecnologia possa deter neste momento, são potencialmente reversíveis no futuro.

- Redução de mão de obra, principalmente não qualificada.
- Pode envolver maiores riscos, uma vez que erros na fase de projeto digital podem acarretar severas consequências em todas as fases subsequentes.
- A maximização da aplicação de betão, como por exemplo o Contour Crafting pressupõe, não é sustentável – cerca de 7% das emissões de CO<sub>2</sub> do planeta são provocadas pela produção de

cimento, devido à combustão e processo de descarbonatação [107] – e por essa razão é importante estudar alternativas.

- Limitação a nível de materiais. Atualmente as impressoras apenas podem imprimir a partir de uma base limitada de materiais e com exceção do Contour Crafting, nenhuma consegue fazê-lo com vários em simultâneo. A tecnologia tem, no entanto, enormes potencialidades a respeito dos materiais que pode usar, podendo-se explorar materiais pouco aplicados e preferencialmente com características ecológicas e processo de fabrico sustentável.
- A superfície final das paredes, realizadas por algumas técnicas, pode não ter as melhores características, exigindo por vezes um certo tratamento e refinamento, ou até a aplicação de painéis de revestimento (como a Winsun colocou).
- A aplicação de alguns materiais em particular, como por exemplo, argamassa cimentícia, ou rocha/areia, podem dar origem a edificações monótonas e austeras.
- A escala que a indústria da construção implica ainda não consegue ser assegurada pelas impressoras desenvolvidas até ao momento.
- No caso de construção no local, as grandes dimensões das impressoras podem criar dificuldades de transporte, montagem/desmontagem e armazenamento no estaleiro, bem como tornar estes processos caros. Com a perspectiva de aumento de escala no futuro, esta situação poderá ter tendência a agravar-se.
- O processo construtivo empregado tornará as paredes maciças, dificultando o acesso a instalações elétricas e tubagens, em casos de necessidade de substituição, adaptação ou reparação.
- A maioria dos processos analisados no decorrer do presente capítulo não permitem a execução de tetos ou coberturas.



# 4

## IMPLICAÇÕES DA IMPRESSÃO 3D NA CONSTRUÇÃO: PERSPETIVA DO DIRETOR DE OBRA

### 4.1 ENQUADRAMENTO

O Diretor de Obra (DO) é definido pela lei 40/2015 como “o técnico habilitado a quem incumbe assegurar a execução da obra, cumprindo o projeto de execução e, quando aplicável, as condições da licença ou comunicação prévia, bem como o cumprimento das normas legais e regulamentares em vigor”. É o profissional responsável pela gestão e coordenação de todos os recursos relacionados com a obra, de forma a garantir que esta é realizada segundo todos os parâmetros legais, e preferencialmente dentro dos prazos e condições estipulados. O DO deve interpretar a obra de forma integral, no entanto, por uma questão de simplificação, esta pode ser fracionada em várias áreas de intervenção. A análise dessas funções primordiais do DO, considerando a integração da Impressão 3D, permitirá aferir as implicações que a implementação desta instigará no processo construtivo.

A implementação do processo tecnológico de Impressão 3D na construção não implica apenas mudanças na forma como se constrói, mas também prevê alterações a nível de software, planeamento, profissionais e competências requeridos para o fazer.

A nível de software, a Autodesk, num esforço conjunto entre as suas equipas, está a desenvolver uma plataforma aberta (acessível e editável por qualquer um) de Impressão 3D designada Spark. Pretende-se que esta cubra todas as gamas de impressoras e o seu objetivo fundamental é criar funcionalidades utilitárias e simplificar o processo de impressão 3D até um ponto em que existirá um botão de Impressão 3D (à semelhança do que já existe para impressão 2D) válido para qualquer impressora.

Uma ferramenta cada vez mais usada no campo da construção e que se prevê que possa ser articulado eficientemente com a tecnologia de Impressão 3D é o BIM (Building Information Modeling). Este software permite a criação de modelos tridimensionais de edifícios, que contenham todas as informações e representações relevantes para o projeto, com a vantagem de estas estarem interligadas entre si, o que permite que quando algum parâmetro for modificado, isso se reflita na restante estrutura e informações associadas. Contém num só ficheiro todas as informações relevantes, em oposição à multiplicidade de documentos individuais, muitas vezes inconsistentes entre si, que métodos convencionais envolvem. Estes elementos normalmente também não possuem informações importantes como listas de materiais e preços, especificações ou mesmo documentos contratuais.

Software BIM permite, portanto, uma abordagem integral do projeto, simplificando consideravelmente a gestão e controlo deste ao longo de todas as fases de projeto e obra. Esta tecnologia quando coordenada com a Impressão 3D pode ser particularmente profícua, em parte porque proporciona uma base comum

tridimensional, e também porque permite detetar com mais facilidade erros de projeto ou de planeamento, numa fase ainda prévia à construção, que é particularmente determinante nesta tecnologia, uma vez que erros no projeto conduzem necessariamente a informações erradas transmitidas à impressora e consequentes erros na fase de construção, durante a qual a sua reparação é mais complicada. No entanto, as próprias dificuldades de implementação do software BIM ou de outros com características semelhantes em meios mais tradicionais ou empresas de cariz mais familiar, formam o primeiro entrave à integração da Impressão 3D, uma vez que estes serão fundamentais para controlar o processo.

Quanto às implicações desta tecnologia no decorrer do processo construtivo, é importante analisá-las segundo uma perspetiva de construção modular pré-fabricada ou de construção in-situ (tanto modular como integral), uma vez que a aplicação de apenas algumas peças ou elementos não acarretará grandes alterações. No caso de construção integral, são requeridas impressoras de grande dimensão, o que complica o seu transporte para obra, a sua instalação, movimentação e ainda o seu armazenamento. Por outro lado, a produção em fábrica de elementos ou módulos pré-fabricados, pode complicar o transporte e montagem, principalmente se forem muitas componentes (dependendo da dimensão do edifício), de grande porte e maciças. Neste tipo de situações uma boa solução seria fabricar apenas os contornos dos elementos, transportá-los e só depois de concluir a instalação, preenchê-los com um material mais resistente (porventura betão ou um material semelhante). No entanto, a solução que parece ser mais proveitosa e eficiente é a instalação de uma unidade móvel de fabrico no local de construção. Esta poderia estar equipada com várias impressoras, dependendo das dimensões da obra, facilitando o transporte das componentes pré-fabricadas, e permitindo solucionar os problemas relacionados com o armazenamento da impressora e proteção desta contra condições ambientais adversas ou atos de vandalismo. Poderia ainda garantir melhores condições de cura para o material, também independentes de condições climáticas e possivelmente com uma temperatura ambiente interior mais adequada.

Quanto maior for a obra, mais apoio terá de ter o DO, surgindo profissionais como o coordenador de segurança, engenheiro de qualidade e fiscal de obra. Relativamente ao coordenador de segurança, é importante ter em conta a redução de mão de obra e as dimensões da obra, aspetos mediante os quais o seu trabalho poderá ser dispensado, sendo essas funções desempenhadas apenas pelo DO. Em situação de construção integral, a mão de obra não deverá estar sujeita às tarefas mais perigosas, estando essas ao encargo da impressora, mas a nível de pré-fabricação, o manuseamento de componentes pesadas poderá proporcionar alguns riscos, que devem ser alvo de medidas preventivas. O engenheiro de qualidade poderá ter um papel importante na monitorização da produção de material bem como dos processos de fabrico, quer decorram em obra ou em fábrica. O fiscal de obra (ou equipa de fiscalização), que em parte também poderá desempenhar algumas das funções dos profissionais anteriormente referidos, pode ter um papel importante, principalmente em obras de maior dimensão, na supervisão de procedimentos, contribuindo para uma execução com maior qualidade, dentro dos prazos e das normas estabelecidas. Este tipo de atividades pode ser minimizado através de uma boa administração na fase de projetos, tarefa que ganha relevância nesta tecnologia de Impressão 3D, uma vez que o projeto é executado de forma automática, não sendo passível de ser interpretado antes.

O DO tem ainda a função de gestão de conflitos em obra, devendo funcionar como moderador e intermediário entre todos os elementos atuantes. Com o incremento de processos de automação e redução da mão de obra, bem como com uma possível tendência para concentração de serviços complementares numa só empresa (principalmente a nível de construção integral), este tipo de problemas, poderá ter tendência a diminuir.



No decorrer do capítulo serão analisadas fundamentalmente as diferenças e não tanto as características que permanecem comuns. Existem características que podem ser inferidas imediatamente a partir das características atuais das impressoras. Outras poderão apenas ser previsíveis ou especulativas.

## **4.2 FUNÇÕES DO DIRETOR DE OBRA [108]**

### **4.2.1 PLANEAMENTO**

Uma das funções elementares do DO é o planeamento da obra. A sua definição orientará o curso da obra. É nesta fase que define as atividades, a sua duração e ordem. Tradicionalmente para o fazer de forma eficiente recorre-se fundamentalmente a dois tipos de métodos distintos: o diagrama Gantt (ou gráfico de barra) ou por outro lado os métodos PERT e CPM. No entanto, considerando a associação de programas BIM aos métodos de Fabricação Aditiva, este tipo de planificação, bem como o seu controlo e reformulação (se necessário), poderá ser feito de forma mais simples e eficiente.

Uma grande vantagem da Impressão 3D é que os seus processos, ao contrário do trabalho humano que não se pode precisar com exatidão, podem ser previamente definidos e calculados, podendo-se efetuar um planeamento mais realista e previsível. Estes prazos de duração de cada tarefa, previamente conhecidos, salvo algum imprevisto exterior, ou erro relacionado com o projeto ou informações enviadas para a impressora, devem ser cumpridos. Depois, restam as tarefas tradicionais que ficam ao encargo da mão de obra. Estas presumivelmente serão realizadas no início da obra – organização do estaleiro, preparação do terreno e elaboração das fundações – e no final como instalações elétricas e hidrosanitárias, revestimentos e outro tipo de acabamentos. Os métodos de previsão destas tarefas terão naturalmente de ser diferentes, e por isso serão mais suscetíveis a erros.

Pode ser enquadrada no planeamento uma das primeiras medidas que têm de ser exercidas, que consiste no estabelecimento e organização do estaleiro. A delimitação da área pode-se fazer de forma normal, mas é necessário considerar espaço suficiente para instalação e transporte da impressora (ou possivelmente das impressoras). No caso de uma impressora destinada a impressão integral, considerando que é um equipamento de elevado valor deve-se preparar um armazém no qual esta possa ser armazenada fora dos períodos de trabalho. No entanto, o manuseamento desta não deverá ser fácil, pelo que preferencialmente, sendo a estrutura de apoio ser resistente às adversidades exteriores, se deve proteger a cabeça de impressão, que é o elemento nuclear e terá certamente características mais frágeis. Esta poderá ser protegida no local, ou sendo amovível, pode ser retirada e armazenada. No caso de uma unidade de fabricação, a impressora já estará devidamente acondicionada.

### **4.2.2 CONTROLO DE CUSTOS**

É juntamente com o prazo, um dos fatores mais decisivos no decorrer da obra e como tal assume-se como uma das funções mais importantes do DO. Também neste aspeto, a impressora permite consoante as funções que dela forem requeridas saber previamente as quantidades de material e energia que irá gastar para as realizar, e isso permitirá determinar os preços referentes a essas componentes, e por serem efetuados de forma automatizada, estão menos sujeitos a erros ou atrasos e por isso a incumprimentos de calendário e orçamentais. Também há que ter em consideração os preços relacionados com a impressora em si. Esta poderá ser propriedade da empresa ou se tal não for justificável, poderá eventualmente ser alugada.

#### 4.2.3 MATERIAIS

Nesta categoria, poderão ocorrer grandes mudanças em relação aos materiais convencionalmente usados. Uma delas relaciona-se com a redução de desperdício, uma vez que o processo de impressão 3D tende a usar apenas a quantidade de material requisitado pelo projeto. Mesmo o material não aproveitado poderá em princípio ser reaproveitado para fases posteriores da construção.

A Impressão 3D e as novas técnicas construtivas que possibilita, também representa uma excelente oportunidade para explorar e testar novos materiais, mais baratos e leves e preferencialmente com características ecológicas e sustentáveis. A crescente exploração de materiais deste género pode afetar o modelo tradicional de funcionamento de empresas de comercialização de materiais e até, numa perspetiva mais ampla, a cadeia de aprovisionamento do material. Também é possível que este tipo de empresas incorpore a tecnologia de Impressão 3D a seu favor.

Por exemplo, uma empresa responsável pela produção e comercialização de varões de aço para armaduras de reforço, poderá no futuro produzi-los a partir de processos aditivos, minimizando assim quase totalmente o desperdício e tendo a possibilidade de customizar os elementos em função da forma e características do elementos estruturais aos quais se destinam.

Se o material puder ser extraído do local onde se vai efetuar a construção, pode-se verificar uma diminuição de custos relacionado com a sua aquisição e transporte e ainda uma redução da emissão de gases nocivos.

#### 4.2.4 MÃO DE OBRA

É um dos aspetos no qual as diferenças serão mais notórias. A execução de grande parte do projeto por meios automatizados, dispensa parte considerável da mão de obra humana normalmente envolvida nesta área. Isto acarretará redução de custos, numa das componentes geralmente responsável pelo aumento significativo dos custos totais da obra.

As funções dos trabalhadores que permanecerem passaram por atividades como operação e controlo de máquinas, instalação de componentes modulares, instalação de redes hidrosanitárias e elétrica, realização de acabamentos e ainda preparação e controlo do material no sistema de abastecimento, bem como supervisão do processo de construção automático e apoio do mesmo, se necessário.

Em relação à perda de postos de trabalho, outros setores industriais e o setor agrícola, por exemplo, também já passaram pela mesma situação, e esta não deve ser encarada como uma consequência concretamente negativa, mas como uma evolução natural, que exige capacidade de adaptação por parte de todos os intervenientes.

Outra componente fundamental da gestão de mão de obra é a segurança. A automatização da construção permite reduzir significativamente os riscos e acidentes de trabalho que são tão prevalentes nos métodos construtivos atualmente empregues. Isto por sua vez permitirá reduzir significativamente os custos relacionados com litígios, seguros, tratamentos médicos e permitirá em último caso salvar vidas.

#### 4.2.5 SUBEMPREITADA

As subempreitadas dizem respeito a todos os trabalhos efetuados por entidades exteriores à obra. Existem habitualmente dois tipos de subempreitada, uma com elevada especialização técnica ou de manobra de equipamentos e outra destinada a prestação de serviços de mão de obra. Quanto à última, a sua requisição deverá perder algum fulgor, uma vez que a utilização da impressora permite prescindir

dos serviços de grande parte da mão de obra normal. Relativamente a mão de obra especializada, esta poderá ser requerida para apoio complementar, para efetuar as instalações elementares da edificação na fase final da construção e ainda para manobrar equipamentos, em particular no caso de construção modular, que exigirá transporte, movimentação e instalação de diversas componentes, muitas delas pesadas. Também é previsível que este setor possa sofrer algumas alterações.

#### 4.2.6 EQUIPAMENTOS

Nesta categoria, normalmente inserem-se dois tipos de equipamentos:

- Equipamento de movimentação de terras:

- Escavadoras, de rodas ou de rasto;
- Retroescavadoras;
- Pás carregadoras;
- Buldozers;
- Motoniveladoras;
- Scrapers;
- Rippers;
- Dumpers e camiões.

- Equipamento de construção civil:

- Granuladoras de brita;
- Instalação de betonagem;
- Cilindros compactadores vibradores e de ar comprimido, etc.;
- Tipos de vibradores e placas para betão;
- Dumpers pequenos;
- Máquinas de distribuição de betão e argamassa;
- Gruas.

A primeira gama de máquinas também deverá ser, em grande parte, requerida neste tipo de processos de Impressão 3D (dependendo também das características do terreno em causa), para preparação do terreno, escavação para fundações e transporte e movimentação de cargas (particularmente quando a construção for modular). As funções desempenhadas pelo segundo tipo de máquinas, de uma forma geral, deverão ser passíveis de ser executadas pela impressora em si.

Neste campo, o DO ainda tem de gerir o regime de utilização da máquina, se será por aluguer, compra ou troca. Este aspeto levanta uma questão acerca do processo de comercialização da máquina. Numa primeira fase a aquisição da impressora deverá ser cara. É também importante explorar a possibilidade de aluguer deste tipo de máquinas e a forma e mecanismos através dos quais esta modalidade poderá decorrer.

Também terá de ser garantida a reparação e manutenção dos equipamentos, bem como a logística de apoio a nível de combustíveis, lubrificantes e peças. Isto pressupõe a existência de peças e elementos indispensáveis para o funcionamento da máquina, comercializáveis, que poderão provir diretamente da empresa que fabrica e distribui as impressoras e componentes, ou da empresa que a alugou.

#### 4.2.7 QUALIDADE

A precisão e rigor assegurados por uma máquina que opera de forma automatizada é geralmente superior à conseguida por meios tradicionais, fundamentalmente manuais.

O processo de controlo de qualidade pretende evitar falhas ou erros. Relativamente à impressora, estes poderão ser proporcionados na fase de preparação ou de alimentação do material ou numa fase digital anterior, de projeto e programação. A impressora por si, a não ser que sofra algum problema mecânico, não deverá cometer erros, podendo apenas ser instigada a isso por instruções computacionais incorretas ou por algum problema relacionado com a constituição do material ou processo de bombagem.

Por outro lado, é importante ter em atenção a correta integração das restantes componentes, bem como, no caso de construção modular, verificar o encaixe adequado entre os vários segmentos.

#### 4.2.8 AMBIENTE

Os impactos ambientais serão reduzidos através de poupança energética e eliminação praticamente completa de desperdícios. Estes muitas vezes poderão ser reintegrados na mistura e aplicados em novas camadas. A possibilidade de aplicar materiais naturais provenientes do local, facilmente desmanteláveis e biodegradáveis poderá reduzir o consumo energético e necessidade de transportes, e tudo isto originará menores emissões de CO<sub>2</sub>, permitindo diminuir a pegada de carbono.

Este tipo de tecnologia ainda permite reduzir os ruídos incómodos e o fumo ou poeira tão comuns nos processos de construção tradicionais e que incomodam trabalhadores, transeuntes e habitantes locais.

# 5

## DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

### 5.1 ENQUADRAMENTO

Como já foi referido, esta tecnologia encontra-se ainda numa fase preliminar de desenvolvimento, altamente experimental, vislumbrando-se ainda um longo caminho para por antes da aceitação da indústria como instrumento válido complementar ou alternativo aos processos tradicionalmente empregues.

Este capítulo propõe uma reflexão sobre algumas das questões que têm de ser superadas ou asseguradas para que a Impressão 3D possa ser implementada com sucesso.

### 5.2 DESAFIOS FUTUROS

- Na Europa – Portugal enquadrado – o setor da construção possui 2,9 milhões de empresas, das quais 95% são PME's com menos de 20 funcionários e constitui globalmente uma força de trabalho de 16,4 milhões, que corresponde a 30,4% dos trabalhadores industriais e 7,2% do total da Europa [4]. Aparentemente será difícil implementar este meio tecnológico numa área de atividade com estas condições. É essencial perceber se é realmente vantajoso para as pequenas e médias empresas adquirir uma impressora. Caso para muitas delas não seja, pode-se estudar a possibilidade de desenvolver outro modelo de negócio, como por exemplo o aluguer deste tipo de máquinas, procedimento muito comum para este tipo de empresas, em relação a outro tipo de equipamentos, que não são necessitados regularmente, mas apenas para alguns projetos específicos.
- Com o aumento da aplicação e procura da tecnologia é importante garantir que existam pessoas com qualificações adequadas para as suprir, principalmente no domínio informático. Isto terá necessariamente implicações na estrutura dos planos de estudos dos cursos direcionados para esta área. Poderá também decorrer em parte, e principalmente numa fase inicial de implementação para as pessoas já graduadas, através de formações e workshops, eventualmente promovidos pelas próprias empresa.
- O projeto e instruções digitais assumem um papel fundamental. Se contiverem erros, estes terão repercussão nas fases subsequentes. O controlo e supervisão nesta fase assume assim uma importância vital. Por outro lado, também é importante perceber como se podem resolver estes problemas se apenas forem detetados na fase de construção. Idealmente devem ser detetados através de um software de acompanhamento da obra, que poderá estar intimamente ligado ao computador da máquina e que receberia um sinal de alerta quando fosse detetado algum erro.

Preferencialmente a máquina devia estar programada e ter autonomia suficiente para antes de realizar cada tarefa, interpretar o projeto e determinar se está a operar em conformidade, e caso não esteja, detetar os erros e em função deles, se possível alterar automaticamente os seus procedimentos, ou, no mínimo, parar instantaneamente o seu funcionamento até que esses erros sejam resolvidos e ela reprogramada. É um aspeto que ainda não está estruturado e regularizado devido à falta de conhecimento e aplicação prática. Na construção tradicional, por exemplo, muitos dos problemas são recorrentes, já havendo por isso uma preparação e conjunto de procedimentos de resolução estipulados pela experiência e casos anteriores. Este aspeto exigirá muito trabalho de desenvolvimento da máquina e de software apropriado, bem como fortes mecanismos de articulação entre estas duas componentes.

- Em relação ao tópico anterior, também é necessário compreender em caso de erros irreparáveis, ou de resolução exigente e cara, como será atribuída a responsabilidade. Claro que tal é fundamental perceber onde ocorreu o erro em questão, mas esta perspetiva ilustra a falta de mecanismos de responsabilidade civil vigentes, que por isso terão de ser criados. Se ocorrer uma tendência de concentração dos diversos serviços numa só empresa (em oposição a várias empresas distintas e independentes), poderá ser mais fácil apurar e imputar responsabilidades.
- Reduzir a pegada de carbono do setor. Poderá decorrer a partir do incremento do consumo de materiais locais, com elevado grau de pureza, processo de obtenção pouco nocivo e redução da necessidade de transportes. Esta tendência poderá ter implicações nas cadeias de aprovisionamento tradicionais.
- Questões de logística, gestão e estrutura de cadeias de aprovisionamento poderão ter de mudar. Empresas tradicionais da área podem ser afetadas se os seus produtos deixarem de ser requeridos.
- Desenvolver novos materiais, preferencialmente mais sustentáveis, bem como sistemas de impressão que permitam imprimir vários materiais simultaneamente.
- Desenvolver mecanismos que permitam garantir uma melhor definição e homogeneidade das superfícies dos elementos, uma lacuna ainda notória em grande parte das técnicas desenvolvidas até ao momento.
- Necessidade de cumprir os regulamentos em vigor, mas também de que algumas considerações sejam revistas e adaptadas à tecnologia.
- Necessidade de qualificação, validação e verificação de materiais. Ainda poucas informações se conhecem sobre as características específicas destes materiais, as suas propriedades mecânicas e parâmetros de influência. É fundamental efetuar testes para conhecer estas características e poder compará-las com as de materiais convencionalmente usados, para perceber se podem ser alternativas reais. Se isso se verificar depois é necessário que sejam testados por uma entidade acreditada para poder obter o certificado que lhes possa permitir ser comercializados e usados. Este é um processo que pode ser caro e demorado, portanto é importante perceber se é realmente viável tentar comercializar certos materiais.
- É também importante conhecer as características de durabilidade e comportamento dos materiais a longo prazo para se poder estabelecer uma análise do seu ciclo de vida útil e por consequência do da edificação.
- Desenvolver projetos com materiais que permitam uma maior eficiência energética, de forma a que não tenha que se recorrer posteriormente (pelo menos de forma tão incidente) a sistemas AVAC, permitindo assim poupança energética e evitando poluição ambiental.

- Construir ou elaborar mais projetos que usem argila, devido às suas características apropriadas, como material base de construção.

### 5.3 PROJEÇÕES FUTURAS

- A maioria dos projetos nesta fase são desenvolvidos a partir de um esforço combinado entre empresas de vários setores de atividade – mecânica, construção, arquitetura, química – e isto pode indicar uma mudança de paradigma no futuro, uma vez que esta tecnologia implica conhecimentos multidisciplinares, podendo implicar alterações a nível da coordenação entre as diversas áreas, ou mesmo a nível da constituição das empresas de construção, que poderão passar a incorporar serviços que possam assegurar todas estas exigências. Poderá também implicar alterações nas competências exigidas aos engenheiros, que deverão ser transversais, provenientes de uma formação mais ampla e multidisciplinar (isto poderia por sua vez ter implicações a nível académico, na estrutura dos cursos). Algumas alterações, como se pode compreender pela linha de pensamento anterior, proporcionariam um efeito em cadeia.
- A impressão por módulos tem vantagens relativamente à impressão da estrutura total, uma vez que não implica uma impressora tão grande (e cara) e pode permitir uma construção mais flexível, com implementação de diversas formas e materiais. No entanto o transporte destes blocos, desde a fábrica até ao local de construção, principalmente se forem maciços, pode causar dificuldades, riscos, custos e danos ambientais acrescidos. Mas com este tipo de fabrico e velocidade que pode atingir, pode-se considerar a criação de uma unidade de fabrico no interior do estaleiro, possivelmente (se não for muito caro) com temperatura ambiente regularizável para melhorar as condições de cura do material, e uma ou até mais impressoras a produzir os troços ou módulos (pode decorrer 24h consecutivas, se necessário, o que implicaria que alguns trabalhadores efetuassem turnos noturnos para controlar o processo). Isto evitaria as condicionantes relacionadas com o transporte e problemas associados.
- Um procedimento muito eficiente no futuro, seria, com uma impressora adequada, construir a partir das terras removidas durante os processos de preparação do terreno e escavação para fundação.
- No futuro, empresas que decidam fazer uma forte aposta nesta área, poderão ter um catálogo com vários Templates (projetos ou designs pré-estabelecidos) e o cliente terá dessa forma a possibilidade de selecionar o que mais lhe agrada e terá possibilidade de personalizar vários parâmetros a seu gosto. A empresa poderia apenas vender o projeto, ou poderia ela mesma, reunindo as condições necessárias, executá-lo ou recorrer a empresas com as quais já tivesse parcerias pré-estabelecidas (que poderiam ser especializadas em alguma área requerida particularmente pelo Template escolhido) para o fazer.
- Um pouco ao encontro do que foi dito no parágrafo anterior, segundo o conceito modular promovido pela DUS Architects, os clientes poderão escolher a configuração das suas casas ou apartamentos numa fase prévia à construção.
- Empresas de software de desenho tridimensional, como a Autodesk, deverão realizar melhorias nos seus programas e instalar novas ferramentas, que proporcionem um ajuste ao tipo de design exigido por esta tecnologia e que facilitem os processos posteriores de tratamento de informação e transmissão para a impressora. A Impressão 3D é uma tecnologia tendencialmente Open Source (Fonte Aberta), ou seja, muitos dos programas ou projetos em desenvolvimento estão livres para serem acedidos e editados por qualquer pessoa. Esta característica permite uma

evolução tecnológica muito mais rápida, que poderá ser sempre acessível por qualquer pessoa para usufruto próprio.

## 5.4 CONSTRUÇÃO LUNAR POR IMPRESSÃO 3D

Apesar da tecnologia ainda não estar completamente implementada no planeta Terra, várias entidades espaciais reconhecem e exploram as suas potencialidades para construir na superfície lunar, num objetivo coletivo de colonizar a Lua até ao final do presente século. As características mais interessantes são a possibilidade de ser um processo automatizado, que pode ser efetuado por máquinas robotizadas, não tendo de ser astronautas a fazê-lo em condições exigentes e potencialmente perigosas, e também a possibilidade de empregar matéria-prima local, que iriam encarecer e complicar consideravelmente a expedição se tivessem de ser enviadas a partir da Terra.

### 5.4.1 FOSTER+PARTNERS + D-SHAPE + ESA

A Agência Espacial Europeia (European Space Agency, ESA), encomendou à prestigiada firma de arquitetura Foster+Partners um projeto que contemplasse uma base lunar destinada a alojar 4 astronautas. A localização seria no polo Sul da Lua, onde há praticamente incidência perpétua de luz solar.

Devido às dificuldades relacionadas com o transporte de materiais para a Lua, a empresa considerou a possibilidade de utilizar solo lunar, rególito, na construção da estrutura.

O projeto assenta sensivelmente nas seguintes ideias: em primeiro lugar, a base é desdobrada a partir de um módulo tubular, que pode ser transportado facilmente através de um foguete espacial. Depois uma cúpula insuflável surge de uma extremidade da estrutura para proporcionar suporte estrutural na construção. De seguida robôs móveis imprimem várias camadas de rególito sobre a cúpula, que funcionará como uma casca protetora contra radiações espaciais e microasteróides.

Durante a fase de testes associaram-se a Enrico Dini e com a sua D-Shape criaram um bloco demonstrativo de 1,5 toneladas de rocha basáltica, originária de um vulcão no centro de Itália, cuja composição é 99,8% semelhante a rególito. Este material é misturado com óxido de magnésio para se tornar numa pasta imprimível. Depois aplica-se um aglutinante salgado para converter o material num material tipo rochoso.

De forma a exigir a menor quantidade de material possível, a estrutura da carapaça é constituída por uma espécie de estrutura celular, com aberturas, para otimizar o binómio peso/resistência. [109]



Figura 70 – Modelo digital do projeto previsto [109]





Figura 71 – Bloco experimental de rocha basáltica [110]

#### 5.4.2 NASA + CONTOUR CRAFTING

Também a NASA, com apoio da equipa responsável pelo Countour Crafting desenvolveu um projeto idêntico, designado MS-FACS (Microwave Sinterator Freeform Additive Construction). À semelhança da iniciativa anterior também se localiza no polo sul da Lua, na cratera Shackleton, onde a luz solar e consequentemente a energia solar são praticamente constantes.

Para executar este projeto, está a ser desenvolvido um robô aranha multifuncional, constituído por seis pernas (que podem atingir 8,2m) com rodas nas extremidades, que conterà a cabeça de impressão, denominado ATHLETE (All-Terrain Hex-Limbed Extra-Terrestrial Explorer).

Este será responsável pela construção e montagem de elementos modulares ou pela execução de componentes estruturais, por deposição sequencial de camadas. Em ambas as situações, a fabricação iria ocorrer a partir da sinterização por micro-ondas de partículas de rególito. [111], [112]



Figura 72 – Protótipo teste do ATHLETE [113]



Figura 73 – Representação do ATHLETE a executar uma parede [112]



Figura 74 – Representação de elementos formados por painéis modulares pré-fabricados [112]

Um rover Chariot, munido com uma pá, recolhe rególito da superfície lunar e alimenta o ATHLETE (podem haver vários elementos de cada equipamento a operar em simultâneo) que dispõe e sinteriza as partículas, ou seja aquece-as até um ponto ligeiramente inferior ao de fusão, provocando uma forte união das nano partículas e posterior solidificação, dando origem a um material que se assemelha a cerâmica. Neste processo as partículas deverão atingir temperaturas entre 1200°C e 1500°C. Também se poderá proceder à instalação de membranas insufláveis formadas por materiais como Kevlar e Mylar que seriam posteriormente cobertas por camadas de rególito. A energia solar necessária para estes processos seria garantida por painéis solares instalados na zona prevista de implantação e também nos próprios veículos robóticos. [111], [112]



Figura 75 – Modelo teste do rover Chariot com pá incorporada [114]

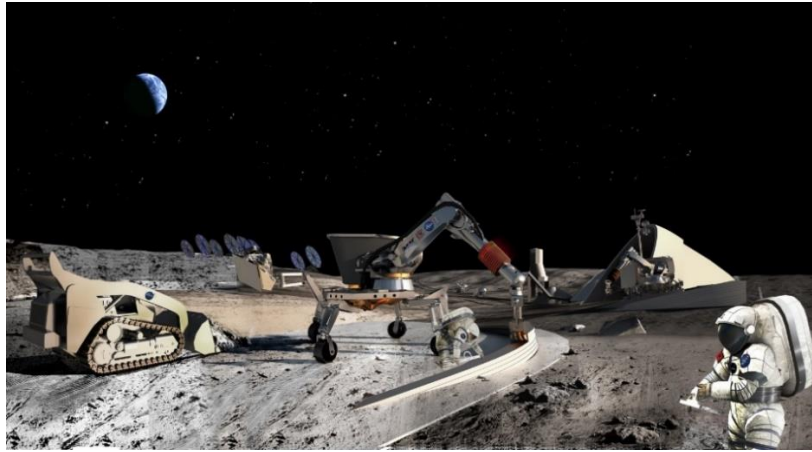


Figura 76 – Representação de construção lunar [115]

Este processo tem a vantagem, em relação ao anterior, de não implicar o envio de substâncias aglutinantes a partir da Terra.



# 6

## CONCLUSÃO

A tecnologia de Impressão 3D, devido à sua versatilidade, tem possibilidades reais de aplicação na indústria da construção. Pode-se considerar a implementação a curto prazo de alguns elementos personalizados, com constituição otimizada, que poderão ser integrados em estruturas executadas com materiais e técnicas convencionais. A aplicação a um nível mais abrangente, ou até total, como é o desejo de alguns promotores da tecnologia, ainda parece estar longe de acontecer. Muitos passos sustentados ainda têm de ser dados nesse sentido. Isso implica uma maior mobilização do setor e abertura para cooperação. É urgente também, antes de mais, testar os materiais que têm sido criados, analisar as suas características e compreender se podem substituir materiais tradicionais, assegurando as propriedades fundamentais. Esta tecnologia dificilmente será capaz de substituir integralmente métodos de construção tradicionais, sendo, no entanto, possível assumir-se como alternativa e sobretudo método complementar. As hipóteses mais fortes de implementação da tecnologia na indústria a médio/longo prazo deverão passar por um sistema semelhante ao Mini-Builders no qual uma equipa de vários robôs com funcionalidades distintas e complementares executam a construção sequencialmente, preterindo a necessidades de uma impressora de grandes dimensões. Por outro lado, e possivelmente de uma forma mais realista, poder-se-ão instalar centros de pré-fabricação no local onde irá decorrer a obra, que serão responsáveis pela produção de várias componentes, elementos ou módulos, que serão depois transportados e montados. Este sistema não implica um sistema de impressão de grandes dimensões, permite a proteção tanto da máquina como dos materiais das adversidades exteriores e evita ainda a necessidade de transportes longos e de todos os problemas daí decorrentes, aparentando por isso ser o modelo mais viável de implementação da tecnologia. O processo de impressão presumivelmente funcionará com uma grande interação com software BIM ou semelhante, que proporcionará um controlo e gestão eficientes de todo o processo.

É ainda importante efetuar os desenvolvimentos necessários para rentabilizar as vantagens proporcionadas pela tecnologia, nomeadamente relacionadas com:

- Personalização da construção tendo em conta as preferências dos futuros utilizadores, bem como as características e exigências próprias do local onde decorrer.
- Construção otimizada, que permite construir elementos com a configuração e quantidade de material exclusivamente necessários para garantir o cumprimento das funções para os quais de destinam.
- Possibilidade de aplicar no processo construtivo materiais extraídos in-situ, reduzindo desta forma custos a todos os níveis, transportes e problemas associados e impactos ambientais.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] D-Shape [http://www.d-shape.com/d\\_shape\\_presentation.pdf](http://www.d-shape.com/d_shape_presentation.pdf), acessido em Outubro de 2015
- [2] PERI <http://www.peri.com.ph/projects/cultural-buildings/museum-of-tomorrow.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [3] *Construction and Demolition Waste Guide*, prepared by Edge Environment Pty Ltd for the Australian Government, Department of Sustainability, Environment, Waste, Population and Communities, (2012).
- [4] *Innovative technologies for buildings: EU funded research to transform the construction sector*. Directorate-Generale for Research, Industrial technologies Unit G2, EUR 24023 EN, 2009.
- [5] Saint-gobain <https://www.saint-gobain.com/en/group/strategy>, acessido em Janeiro de 2016
- [6] ONU <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/world-urbanization-prospects.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [7] ONU <http://www.un.org/youthenvoy/2013/08/un-habitat-united-nations-human-settlements-programme/>, acessido em Janeiro de 2016
- [8] UNHCR <http://www.unhcr.org/558193896.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [9] Caritas [http://www.caritas.org.nz/sites/default/files/Refugee%20Myths%20and%20Realities\\_0.pdf](http://www.caritas.org.nz/sites/default/files/Refugee%20Myths%20and%20Realities_0.pdf), acessido em janeiro de 2016
- [10] Internal Displacement <http://www.internal-displacement.org/publications/2015/global-estimates-2015-people-displaced-by-disasters/>, acessido em Janeiro de 2016
- [11] Io9 <http://io9.gizmodo.com/what-is-the-anthropocene-and-are-you-living-in-it-1441883288>, acessido em Janeiro de 2016
- [12] Flickr <https://www.flickr.com/photos/baggis/3179149748/in/photostream/>, acessido em Janeiro de 2016
- [13] Rider Levett Bucknell <http://rlb.com/wp-content/uploads/2015/02/rlb-prefabrication-and-modular-construction.pdf>, acessido em Janeiro de 2016
- [14] Oxford Dictionary <http://www.oxforddictionaries.com/definition/english/3d-printing>, acessido em Janeiro de 2016
- [15] Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G. F., and Thorpe, A. (2007). *Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction*. *Automation in Construction*, 16(2), 224–231.
- [16] (2014). *3D Printing History: The Free Beginner's Guide*, 3DPI Guide.
- [17] Wohlers, T. Gornet, T. (2012). *History of additive manufacturing*, Wohlers Report.
- [18] Telegraph <http://www.telegraph.co.uk/technology/news/10908560/We-laughed-we-cried-we-stayed-up-all-night-imagining.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [19] Gibson, I. Rosen, W-D. Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer Science.
- [20] *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020*, Report from the European Commission Workshop in Additive Manufacturing, (2014).

- [21] Slideshare <http://www.slideshare.net/HVRF/dr-swee-mak-future-manufacturing-csiro-hrf-june-breakfast-2014>, acessido em Janeiro de 2016
- [22] Mellor, S. (2014) *An Implementation Framework for Additive Manufacturing*. Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Engineering, University of Exeter.
- [23] 3D Stuffmaker <http://www.3dstuffmakers.com/learn-ccad/>, acessido em Janeiro de 2016
- [24] Gross, B-C. Erkal, J-L. Lockwood, S-Y. Chen, C. Spence, D-M. (2014). *Evaluation of 3D Printing and Its Potential Impact on Biotechnology and the Chemical Sciences*. Michigan State University, Department of Chemistry.
- [25] van Wijk, A. van Wijk, I. (2015). *3D Printing with Biomaterials: Towards a Sustainable and Circular Economy*, IOS Press under the imprint Delft University Press.
- [26] ITAC <http://itac.nyc/infographic-the-power-of-3d-printing-in-manufacturing-an-illustrated-guide/>, acessido em Janeiro de 2016
- [27] Deloitte University Press <http://dupress.com/articles/future-of-additive-manufacturing-industry-speaks/>, acessido em Janeiro de 2016
- [28] Wang, Y. Leu, M-C. (2013). *Frontiers of Additive Manufacturing, Research and Education*. Report of NSF Additive Manufacturing Workshop. Published by University of Florida, Center of Manufacturing Research.
- [29] Design Engineering <http://www.design-engineering.com/study-3d-printing-saves-weight-fuel-in-aerospace-design-136069/>, acessido em Janeiro de 2016
- [30] Technology Review <http://www.technologyreview.com/demo/425133/printing-parts/>, acessido em Janeiro de 2016
- [31] 3dengr <http://www.3dengr.com/3d-printing-potential-to-change-the-automotive-industry.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [32] Wired <http://www.wired.com/2015/01/3-d-printed-prosthetics-look-fit-sci-fi-warrior/>, acessido em Janeiro de 2016
- [33] Research Career <http://www.researchcareer.com.au/archived-news/3d-printed-teeth-take-bite-at-bacteria>, acessido em Janeiro de 2016
- [34] Softpedia <http://news.softpedia.com/news/Nick-Ervinck-s-3D-Printed-Art-Takes-Europe-by-Storm-447802.shtml>, acessido em Janeiro de 2016
- [35] Forbes <http://www.forbes.com/sites/rachelhennessey/2013/08/07/3-d-printed-clothes-could-be-the-next-big-thing-to-hit-fashion/#3281529e34dd>, acessido em Janeiro de 2016
- [36] Soma Magazine <http://www.somamagazine.com/continuum-3d-printing/>, acessido em Janeiro de 2016
- [37] RepRap <http://reprap.org/wiki/RepRap/pt>, acessido em Dezembro de 2015

- [38] ZCorp [http://www.zcorp.com/documents/311\\_Henning%20Larsen%20Architects%20final.pdf](http://www.zcorp.com/documents/311_Henning%20Larsen%20Architects%20final.pdf),  
acedido em Dezembro de 2015
- [39] 3D Innovate <http://3dinnovate.org/casestudies/henninglarsen.html>,  
acedido em Dezembro de 2015
- [40] 3D Systems [http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/18\\_CaseStudy-Ramboll-FINAL.pdf](http://www.3dsystems.com/sites/www.3dsystems.com/files/18_CaseStudy-Ramboll-FINAL.pdf),  
acedido em Dezembro de 2015
- [41] Archiscene <http://www.archiscene.net/firms/henning-larsen-architects/harpa-concert-hall-conference-centre/>,  
acedido em Janeiro de 2016
- [42] No Destinations <http://www.nodestinations.com/blog/harpa-reykjavik-iceland>,  
acedido em Janeiro de 2016
- [43] Ramboll <http://www.ramboll.com/projects/group/elephanthouse>,  
acedido em Dezembro de 2015
- [44] Foster and Partners <http://www.fosterandpartners.com/news/archive/2006/10/goundbreaking-for-the-elephant-house-at-copenhagen-zoo/>,  
acedido em Dezembro de 2015
- [45] Aeirotec <http://aeirotec.com/z450>,  
acedido em Janeiro de 2016
- [46] Cadalyst <http://www.cadalyst.com/hardware/wide-format-printers-plotters/news/job-3d-printing-gives-footwear-company-leg-competition-6>,  
acedido em Janeiro de 2016
- [47] The New Stack <http://thenewstack.io/emerging-objects-3d-printing-pioneers-will-build-houses-salt/>,  
acedido em Janeiro de 2016
- [48] Emerging Objects <http://www.emergingobjects.com/projects/cool-brick/>,  
acedido em Novembro de 2015
- [49] Emerging Objects <http://www.emergingobjects.com/projects/quake-column/>,  
acedido em Novembro de 2015
- [50] Emerging Objects <http://www.emergingobjects.com/projects/saltygloo/>,  
acedido em Novembro de 2015
- [51] Dezeen <http://www.dezeen.com/2014/06/11/arup-3d-printed-structural-steel-building-components/>,  
acedido em Dezembro de 2015
- [52] ARUP [http://www.arup.com/News/2015\\_05\\_May/11\\_May\\_3D\\_makeover\\_for\\_hyper-efficient\\_metalwork.aspx#!lb:News/2015\\_05\\_May/11\\_May\\_3D\\_makeover\\_for\\_hyper-efficient\\_metalwork/11\\_May\\_gallery2.aspx](http://www.arup.com/News/2015_05_May/11_May_3D_makeover_for_hyper-efficient_metalwork.aspx#!lb:News/2015_05_May/11_May_3D_makeover_for_hyper-efficient_metalwork/11_May_gallery2.aspx),  
acedido em Dezembro de 2015
- [53] 3dprint <http://3dprint.com/64376/cutting-edge-3d-printing/>,  
acedido em Janeiro de 2016
- [54] 3ders <http://www.3ders.org/articles/20150730-branch-technology-unveils-next-generation-cellular-fabrication-for-3d-printing-houses.html>,  
acedido em Novembro de 2015
- [55] Architect Magazine [http://www.architectmagazine.com/technology/this-architect-designed-wall-system-has-a-3d-printed-core\\_o](http://www.architectmagazine.com/technology/this-architect-designed-wall-system-has-a-3d-printed-core_o),  
acedido em Novembro de 2015



- [56] Engenharia [http://www.iengenharia.org.br/site/noticias/exibe/id\\_sessao/4/id\\_noticia/9410/A-maior-impressora-3D-de-formato-livre-do-mundo-est%C3%A1-construindo-casas](http://www.iengenharia.org.br/site/noticias/exibe/id_sessao/4/id_noticia/9410/A-maior-impressora-3D-de-formato-livre-do-mundo-est%C3%A1-construindo-casas), acessado em Novembro de 2015
- [57] [https://www.youtube.com/watch?v=vw4Ygw8FqRw&ab\\_channel=IndependentReporter\(IR.net\)](https://www.youtube.com/watch?v=vw4Ygw8FqRw&ab_channel=IndependentReporter(IR.net)), acessado em Novembro de 2015
- [58] 3D Printing Industry <http://3dprintingindustry.com/2015/07/28/branch-technology-is-3d-printing-the-future-of-construction-one-wall-at-a-time/>, acessado em Novembro de 2015
- [59] IAAC <http://iaac.net/research-projects/large-scale-3d-printing/pylos/>, acessado em Novembro de 2015
- [60] ArchDaily <http://www.archdaily.com/776261/iaac-researchers-pylos-3d-prints-with-soil>, acessado em Novembro de 2015
- [61] Pylos IAAC <http://pylos.iaac.net/main.html>, acessado em Novembro de 2015
- [62] Robots IAAC <http://robots.iaac.net/#robots>, acessado em Novembro de 2015
- [63] Monograph <http://monograph.io/iaac/minibuilders>, acessado em Novembro de 2015
- [64] DUS Architects <http://www.dusarchitects.com/officeprofile.php>, acessado em Novembro de 2015
- [65] Archdaily <http://www.archdaily.com/491666/first-3d-printed-house-to-be-built-in-amsterdam/>, acessado em Novembro de 2015
- [66] Domus [http://www.domusweb.it/en/architecture/2013/05/21/printable\\_futures.html](http://www.domusweb.it/en/architecture/2013/05/21/printable_futures.html), acessado em Janeiro de 2016
- [67] Planet Vector Works <http://planet.vectorworks.net/2013/07/the-worlds-first-mobile-3d-printer-makes-history/>, acessado em Janeiro de 2016
- [68] van der Veen, A-C. (2014). The Structural Feasibility of 3D-printing houses using printable polymers. Dissertação de mestrado, Delft University of Technology.
- [69] 3D Print Canal House <http://3dprintcanalhouse.com/>, acessado em Novembro de 2015
- [70] 3D Printing <http://3dprinting.com/news/dutch-company-3d-prints-entire-canal-house/>, acessado em Novembro de 2015
- [71] WASP Project <http://www.wasproject.it/w/en/faq-bigdelta-12m/>, acessado em Novembro de 2015
- [72] Science Alert <http://www.sciencealert.com/the-world-s-largest-3d-printer-can-now-make-entire-houses-out-of-clay/>, acessado em Novembro de 2015
- [73] Techxplore <http://techxplore.com/news/2015-09-d-wasp-maker-economy-home.html>, acessado em Janeiro de 2016
- [74] Design Boom <http://www.designboom.com/technology/wasp-project-big-delta-large-scale-3d-printer-09-18-2015/>, acessado em Janeiro de 2016
- [75] Slash Gear <http://www.slashgear.com/massive-big-delta-3d-printer-can-print-houses-from-mud-and-clay-18405463/>, acessado em Janeiro de 2016
- [76] Apis Cor [http://apis-cor.com/files/tech\\_spec\\_en.pdf](http://apis-cor.com/files/tech_spec_en.pdf), acessado em Novembro de 2015
- [77] 3dprint <http://3dprint.com/100229/apis-cor-3d-printer-buildings/>, acessado em Janeiro de 2016

- [78] 3ders <http://www.3ders.org/articles/20151009-apis-cor-circular-mobile-3d-printer-can-3d-print-houses-and-construction-on-site.html> , acessido em Novembro de 2015
- [79] Inhabitat <http://inhabitat.com/portable-apis-cor-3d-printer-crafts-a-multi-story-630-square-foot-home-i-a-day/apis-cor-3d-printer-for-houses/>, acessido em Janeiro de 2016
- [80] 3D Printing Industry <http://3dprintingindustry.com/2015/10/07/apis-cor-mobile-3d-printer-seeks-to-bring-3d-printed-construction-on-site/>, acessido em Janeiro de 2016
- [81] Nrgm <http://www.nrgm.nl/features/cross-this-bridge-when-you-come-to-it/>, acessido em Outubro de 2015
- [82] Dezeen <http://www.dezeen.com/2014/02/21/3d-printing-robot-by-joris-laarman-draws-freeform-metal-lines/>, acessido em Outubro de 2015
- [83] Robotiq <http://blog.robotiq.com/bid/70408/How-to-Choose-the-Right-Industrial-Robot>, acessido em Janeiro de 2016
- [84] Archpaper <http://blog.archpaper.com/2015/07/new-robot-technology-dutch-designer-can-3d-print-steel-bridge-mid-air-canal/#.VpU4mxWLTIV>, acessido em Janeiro de 2016
- [85] D-Shape [http://www.d-shape.com/d\\_shape\\_presentation.pdf](http://www.d-shape.com/d_shape_presentation.pdf), acessido em Outubro de 2015
- [86] Wikipédia <https://en.wikipedia.org/wiki/D-Shape> , acessido em Outubro de 2015
- [87] The creative chair <http://thecreativechair.org/janjaap-ruijsenaars-designs-the-worlds-first-printed-house/>, acessido em Janeiro de 2016
- [88] Il Sole 24ore [http://foto.ilsole24ore.com/SoleOnLine5/Economia/Aziende/2010/Dinitech/Dinitech\\_fotogallery.php?id=5](http://foto.ilsole24ore.com/SoleOnLine5/Economia/Aziende/2010/Dinitech/Dinitech_fotogallery.php?id=5), acessido em Janeiro de 2016
- [89] 3d-expo <http://3d-expo.ru/en/dutch-architects-say-3d-print-technology-could-solve-worlds-housing-problems>, acessido em Janeiro de 2016
- [90] Archdaily <http://www.archdaily.com/253380/how-3d-printing-will-change-our-world>, acessido em Janeiro de 2016
- [91] Youtube [https://www.youtube.com/watch?v=mCp-UbiT5Ds&ab\\_channel=AssociatedPress](https://www.youtube.com/watch?v=mCp-UbiT5Ds&ab_channel=AssociatedPress), acessido em Outubro de 2015
- [92] 3ders <http://www.3ders.org/articles/20121030-worlds-first-3d-printed-reef.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [93] Wired <http://www.wired.co.uk/news/archive/2013-10/03/enrico-dini-archinature>, acessido em Janeiro de 2016
- [94] D-Shape <http://www.d-shape.com/>, acessido em Outubro de 2015
- [95] All3dp <https://all3dp.com/biggest-3d-printers-world/>, acessido em Novembro de 2015
- [96] Dezeen <http://www.dezeen.com/2014/04/24/chinese-company-3d-prints-buildings-construction-waste/>, acessido em Novembro de 2015
- [97] Yhbm <http://www.yhbm.com/index.php?m=content&c=index&a=lists&catid=67>, acessido em Novembro de 2015

- [98] 3dtruck <http://3druck.com/gastbeitraege/shanghai-10-haeuser-aus-dem-3d-drucker-innerhalb-eines-tages-2616651/>, acessido em Novembro de 2015
- [99] Techspot <http://www.techspot.com/news/59451-11840-square-foot-mansion-3d-printed.html>, acessido em Novembro de 2015
- [100] Khoshnevis, B. (2004) Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies. Automation in Construction – Special Issue, 13, 5-19.
- [101] Khoshnevis, B. (2004). Houses of the Future: Construction by Contour Crafting Building Houses for Everyone. Urban Initiative Policy Brief
- [102] Alum Sharif [http://alum.sharif.ir/~a\\_shahidi/ContourCrafting.htm](http://alum.sharif.ir/~a_shahidi/ContourCrafting.htm), acessido em Janeiro de 2016
- [103] Inhabitat <http://inhabitat.com/tag/contour-crafting/>, acessido em Janeiro de 2016
- [104] Contour Crafting <http://www.contourcrafting.org/high-resolution-photographs/>, acessido em Outubro de 2015.
- [105] Kwon, H. (2002) *Experimentation and Analysis of Contour Crafting (CC) Process Using Uncured Ceramic Materials*. Dissertação de Mestrado, University of Southern California.
- [106] Youtube <https://www.youtube.com/watch?v=TTY3hGuVLM8>, acessido em Janeiro de 2016
- [107] Work Safety <http://worksafety.blogspot.pt/2011/11/minimizando-os-riscos-poluentes-nas.html>, acessido em Janeiro de 2016
- [108] Coutinho, J. (2013). *Análise de um Guia de Procedimentos na Construção – Proposta para Direção de Obra*, Dissertação de Mestrado, FEUP
- [109] Foster+Partners. (2012). Lunar Habitation
- [110] ESA  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Engineering\\_Technology/Building\\_a\\_lunar\\_base\\_with\\_3D\\_printing](http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Engineering_Technology/Building_a_lunar_base_with_3D_printing), acessido em Dezembro de 2015
- [111] A-etc <http://www.a-etc.net/sinterhab/>, acessido em Dezembro de 2015
- [112] Howe, A-S, Wilcox, B, McQuin, C, Mittman, D, Townsend, J, Polit-Casillas, R, Litwin, T. (2014). *Modular Additive Construction Using Native Materials*, 14th Earth and Space Conference
- [113] NASA [http://www.nasa.gov/exploration/analogs/desertrats/desert\\_rats\\_2009.html](http://www.nasa.gov/exploration/analogs/desertrats/desert_rats_2009.html), acessido em Janeiro de 2016
- [114] Commons Wikimedia  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEV\\_Chariot\\_with\\_LANCE\\_grading\\_blade.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SEV_Chariot_with_LANCE_grading_blade.jpg), acessido em Janeiro de 2016
- [115] NASA  
[https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2012\\_phaseII\\_fellows\\_khoshnevis.html#.VqenmhWLTIU](https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2012_phaseII_fellows_khoshnevis.html#.VqenmhWLTIU), acessido em Janeiro de 2016

## BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

Lipson, H. *Frontiers in Additive Manufacturing: The Shape of Things to Come*. The Bridge, Volume 42, Number 1. Spring 2012

S. Shipp, S. Gupta, N. Lal, B. A. Scott, J. L. Weber, C. S. Finnin, M. Blake, M. Newsome, S. Thomas, S. *Emerging Global Trends in Advanced Manufacturing*. IDA Paper P-4603, Institute for Defense Analyses.

*The future of 3-D printing: Moving beyond prototyping to finished products*. PwC Technology Forecast. Issue 2, 2014.

Silva, J. *Bio-inspiração aplicada a estruturas de betão: desafios e possibilidades associadas às técnicas de impressão 3D*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho

Strauß, H. *The potential of Additive Manufacturing for façade construction*. Dissertação de Mestrado, Delft University of Technology, Faculty of Architecture

Dolhan, V. *3D Printing in Architecture: A Current State of the Industry with Past and Future Perspectives*. Dissertação de Mestrado, VIA University College, School of Technology and Business.

Scöld, G., Vidarsson, H. *Analyzing the Potentials of 3DPrinting in the Construction Industry: Considering implementation characteristics and supplier relationship interfaces*. Dissertação de Mestrado, Chalmers University of Technology, Department of Technology Management and Economics, Division of Industrial Marketing.