



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

Engenharias

Indústria 4.0

Manufatura Aditiva e o seu potencial de inovação

Bruno Filipe Mendes Cardoso

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia e Gestão Industrial

(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Fernando Santos

Covilhã, 17 de setembro de 2019

Agradecimentos

Quero demonstrar o meu agradecimento, pelo apoio ao desenvolvimento desta dissertação, ao meu orientador, o Professor Doutor Fernando Santos. O seu envolvimento e contributo foi fundamental para a escolha do tópico e para o desenvolvimento dum trabalho com qualidade, o que me permitiu expandir o meu conhecimento sobre o tema.

Também quero agradecer à minha família, nomeadamente aos meus pais, pelo apoio que me foram dando ao longo do tempo, o que me ajudou a ter determinação e perseverança para concluir esta etapa final do percurso académico.

Resumo

O ser humano, enquanto ser criativo, sempre produziu objetos para seu benefício. Isto aplica-se desde o início dos tempos, até aos dias de hoje. No entanto, a atividade de produção foi sempre subtrativa, ou seja, o desperdício de material é uma consequência da própria atividade. No entanto, perto do final do século XX, surge a manufatura aditiva, uma tecnologia revolucionária que pretende afirmar-se como o novo paradigma de produção. A manufatura aditiva é um processo de produção de objetos de forma aditiva, em que o desperdício de material é extremamente reduzido ou praticamente inexistente. O seu aparecimento e desenvolvimento surge numa altura em que a própria sociedade procura reinventar-se, ao serem cada vez mais relevantes conceitos como a sustentabilidade e a gestão eficiente de recursos disponíveis. A manufatura aditiva, enquanto tecnologia de produção, apresenta-se como a solução disruptiva que, provavelmente, será capaz de revolucionar a indústria de produção moderna.

Palavras-chave

Indústria 4.0; Manufatura aditiva; inovação; futuro da produção; eficiência.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Motivação e pertinência do tema	1
1.3. Objetivos gerais e específicos	1
1.4. Metodologia	1
1.5. Estrutura da dissertação	2
2. Contextualização Histórica	3
2.1. Evolução da Indústria	3
2.2. Expectativas da Nova Revolução	5
3. Indústria 4.0	7
3.1. Internet of Things (IoT)	8
Smart Factory	8
Smart Products	9
Vantagens para os Consumidores	9
3.2. Cyber-Physical Systems	9
4. Manufatura Aditiva	11
4.1. Processos	12
Stereolithography	12
Fused Deposition Modelling	13
3DP	14
Selective Laser Sintering	15
Electron Beam Melting	17
Laser Metal Deposition	17
Laminated Object Manufacturing	19
Multi-Jet Modelling	20
Continuous Liquid Interface Production	21
High-Resolution Eletrohydrodynamic Direct Printing	22
4.2. Novos Materiais	24
Metal Líquido Condutor	24
Outros Materiais Condutivos	25
Materiais Inteligentes	26
Hidráulicos e Eletrônicos	26
Materiais Especiais	26
4.3. Processos de Nova Geração	28
Concrete Printing	28
Lunar Printing	31
Bioprinting	34

5. Generative AI Design	36
Conclusão	40
Referências Bibliográficas.....	42

Lista de Figuras

Figura 1 - Cronologia das Revoluções Industriais (Fonte: DemandBase, 2017).....	4
Figura 2 - Ondas de Kondratieff	5
Figura 3 - Esquema do processo SLA.....	12
Figura 4 - Esquema do processo FDM.....	13
Figura 5 - Esquema do processo 3DP	14
Figura 6 - Esquema do processo SLS	15
Figura 7 - Esquema do processo EBM.....	17
Figura 8 - Esquema do processo LMD.....	18
Figura 9 - Esquema do processo LOM.....	19
Figura 10 - Esquema do processo MJM	20
Figura 11 - Esquema do processo CLIP	21
Figura 12 - Esquema do processo EHD.....	23
Figura 13 - a) Manufatura direta com metal líquido à base de gálio e índio; b) Recriação, com autorização de John Wiley and Sons, Copyright 2013, de micro canais em 3D com metal líquido como base; c, d) Recriação, com autorização de John Wiley and Sons, Copyright 2013, de estruturas 3D condutivas a partir de metal líquido.	24
Figura 14 - Esquema da extrusora do processo CC	28
Figura 15 - Esquema do processo CC	29
Figura 16 - Estrutura criada através do processo D-Shape	30
Figura 17 - Concetualização artística da futura Aldeia Lunar (Fonte: ESA)	32
Figura 18 - Exemplos de regolito lunar produzido através de sinterização a laser	33
Figura 19 - a) Estrutura óssea produzida a partir de fosfato tricálcico; b) Imagem da superfície ampliada com um microscópio MEV.	35
Figura 20 - Estrutura de uma cadeira a ser projetada através de algoritmos generativos	36
Figura 21 - Partição gerada através de algoritmos generativos	37
Figura 22 - Protótipo funcional da ponte MX3D em exposição na Dutch Design Week 2018 (Fonte: Dutch Design Week)	38
Figura 23 - a) Design inicial do chassis; b) Design final do chassis gerado através de algoritmos generativos.....	39
Figura 24 - Protótipo digital do resultado final representado com recurso a realidade virtual	39

Lista de Acrónimos

ABS - acrilonitrila butadieno estireno

AI - artificial intelligence

AR - augmented reality

CAD - computer aided design (desenho assistido por computador)

CAM - computer aided manufacturing (manufatura assistida por computador)

CAPP - computer aided process planning (planeamento de processos assistido por computador)

CC - contour crafting

CLIP - continuous liquid interface production

CNC - computer numerical control (controlo numérico computadorizado)

CPPS - cyber-physical production systems

CPS - cyber-physical systems

DMD - digital micromirror device

EBM - electron beam melting

EHD - high-resolution eletrohydrodynamic direct printing

ESA - european space agency

FDM - fused deposition modelling

IoT - internet of things

LENS - laser engineered net shaping

LMD - laser metal deposition

LOM - laminated object manufacturing

MEV - microscópio eletrónico de varredura

MJM - multi-jet modelling

NASA - national aeronautics and space administration

NSF - national science foundation

PC - policarbonato

PC-ISO - policarbonato biocompatível

PPSF - polifenilssulfona

RFID - radio frequency identification

SLA - stereolithography

SLM - selective laser melting

SLS - selective laser sintering

SMA - shape-memory alloy

SMP - shape-memory polymer

STL - stereolithography file

VR - virtual reality

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Esta dissertação em Engenharia e Gestão Industrial procura fazer um estudo exploratório sobre uma das tecnologias associadas à Indústria 4.0, a Manufatura Aditiva. Esta tecnologia surgiu na década de 1980 e está a ganhar cada vez mais notoriedade. Pretende-se ter um conhecimento generalizado sobre a evolução da indústria e aquilo que representa a Indústria 4.0 e mais aprofundado sobre a Manufatura Aditiva e as suas componentes.

1.2. Motivação e pertinência do tema

A Indústria 4.0 é um termo relativamente recente e apresenta-se como um novo modelo organizacional que engloba diferentes tipos de tecnologias, e de acordo com alguns autores configura uma nova revolução industrial. A Manufatura Aditiva é uma das tecnologias associadas à Indústria 4.0 e caracteriza-se por ser uma tecnologia inovadora que vem alterar a forma como o ser humano desenvolve a atividade de criação e produção. Por ser uma tecnologia que tem o potencial de revolucionar a indústria da produção em inúmeros setores de atividade, será o tema principal do trabalho.

1.3. Objetivos gerais e específicos

Com a realização desta investigação pretendo descrever e caracterizar a Indústria 4.0 de forma a que se perceba a importância da mesma, relativamente ao desenvolvimento da sociedade, indústria e de vários outros setores de atividade associados. O objetivo específico é caracterizar a Manufatura Aditiva e descrever os vários tipos de processos existentes, para se perceber até que ponto a tecnologia está evoluída. Por fim, procuram-se identificar os vários tipos de utilização futura desta tecnologia, tendo em conta diferentes tipos de processos e/ou materiais que podem vir a revolucionar alguns setores de atividade.

1.4. Metodologia

A metodologia utilizada para a realização desta dissertação envolveu trabalho de pesquisa e análise de artigos científicos em bases de dados académicas. Os tópicos foram desenvolvidos após o tratamento da informação.

1.5. Estrutura da dissertação

Esta dissertação inicia-se com uma contextualização histórica referente à indústria, a nível global, que tem como objetivo fazer uma caracterização de como é que evoluiu com o passar dos anos e como se encontra atualmente. Também é feita uma análise sobre as expectativas da nova revolução industrial. Seguidamente, o foco recai sobre uma descrição daquilo que é a Indústria 4.0, os seus variados conceitos e as suas principais tecnologias disruptivas. No tópico seguinte, a manufatura aditiva é descrita de forma aprofundada, sendo que é feita a sua caracterização e uma descrição dos inúmeros processos diferentes que existem, bem como de alguns materiais inovadores com os quais se pode trabalhar. São descritos alguns processos extremamente inovadores e que podem alterar ou melhorar significativamente certos setores de atividade. Na parte final, é descrita uma abordagem diferente no que toca à criação de produtos através da manufatura aditiva, utilizando tecnologias de inteligência artificial como forma de conceptualização dos próprios objetos.

2. Contextualização Histórica

A Indústria 4.0 é um conceito que surge em novembro de 2011, num artigo publicado pelo governo alemão, relativamente a uma estratégia de desenvolvimento tecnológico para 2020 (1). No fundo, pode caracterizar-se como sendo um conjunto de avanços e desenvolvimentos tecnológicos disruptivos, que afetam a indústria a nível global, tais como a IoT (internet of things), os CPS (cyber-physical systems), a VR/AR (virtual/augmented reality), o Cloud Computing e a Manufatura Aditiva (2,3).

2.1. Evolução da Indústria

A indústria tem evoluindo ao longo do tempo, desde o início das civilizações, até aos dias de hoje. Este desenvolvimento surge através da criação e aperfeiçoamento de novas tecnologias e, até, de novos materiais. Contudo, em determinadas alturas surgem certas inovações tecnológicas que vêm alterar drasticamente a forma com as próprias sociedades se estruturam. Estes períodos de elevada inovação tecnológica são designados por Revoluções Industriais.

A primeira revolução industrial ocorreu por volta da década de 1760, quando é inventado, na Inglaterra, o primeiro motor a vapor. A sua criação permitiu o desenvolvimento de sistemas de produção mecânicos que vieram revolucionar o trabalho agrícola e, ao mesmo tempo, que começavam a definir uma estrutura económica na sociedade. A utilização de carvão como fonte de energia principal proporcionou o crescimento da indústria ferroviária, que, por sua vez, acelerou o processo de crescimento económico e troca de bens entre comunidades. Também se vê um aumento no número de fábricas têxteis, devido às vantagens em termos de produtividade em relação à produção artesanal. Nesta época, que se estende até cerca de 1900, os materiais mais utilizados foram os têxteis e o ferro (4,5).

A segunda revolução industrial dá-se por volta de 1850, tendo-se prolongado, segundo alguns autores, até meados do século XX ou até à segunda guerra mundial. A segunda revolução industrial aparece frequentemente associada à utilização da eletricidade e do petróleo. Outro aspeto que marca esta revolução é o desenvolvimento dos conceitos de produção em massa e da divisão do trabalho, preconizados por Henry Ford. Estas inovações vêm revolucionar a produtividade nos países industrializados e a própria sociedade começa a sentir esse impacto diretamente nas suas condições de vida. É ainda inventado o primeiro motor de combustão interna, que dá origem, conseqüentemente, ao primeiro automóvel comercializado, o icónico Ford T, um marco que revoluciona a indústria dos transportes e a mobilidade das pessoas na sociedade. As indústrias que mais crescem, durante este período, são as de fabrico de maquinaria e a automóvel (2,4,6).

A terceira revolução industrial surge durante a parte final do século XX, entre 1960 e 2000, e deriva das evoluções tecnológicas no campo da eletrónica. São criados os microchips, ou circuitos integrados, objetos capazes de automatizar o processo produtivo através do controlo eletrónico dos equipamentos. O desenvolvimento contínuo das tecnologias de informação e comunicação começa a digitalizar o mundo industrial, que está cada vez mais interligado e automatizado. Torna-se possível a criação e desenvolvimento de produtos em ambiente digital, através do aparecimento de tecnologias como CAD/CAM (desenho assistido por computador/manufatura assistida por computador) ou CAPP (planeamento de processos assistido por computador), e a sua fabricação em máquinas CNC (controlo numérico computacional). Estas inovações vieram acelerar o crescimento da indústria, que agora se sente a uma escala global. A sustentar todo este crescimento está a energia nuclear e o gás natural, que fornecem todos os requisitos energéticos para a indústria sobreviver. O meio de transporte de destaque, deste período, é o avião, o qual é indispensável nesta sociedade cada vez mais rápida, interligada e globalizada (2,5,6).

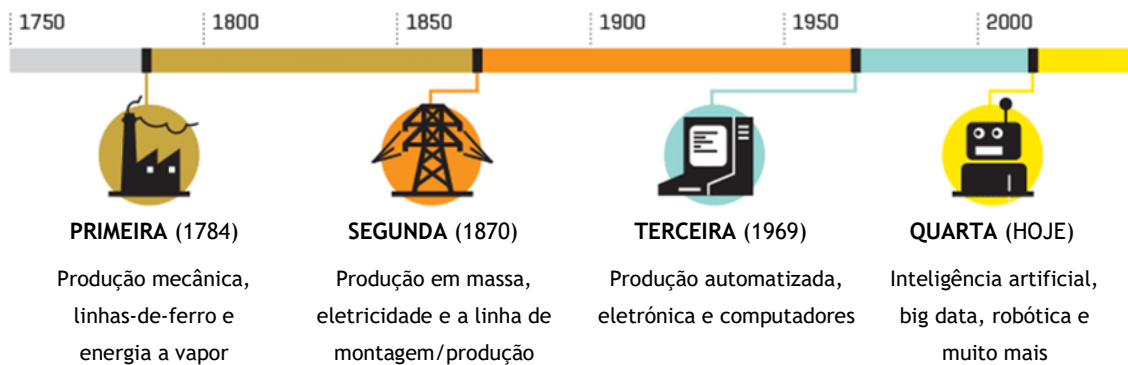


Figura 1 - Cronologia das Revoluções Industriais (Fonte: DemandBase, 2017)

Estes desenvolvimentos culminam com a entrada no novo milénio e com o início da quarta revolução industrial, denominada Indústria 4.0. Como Xu, David e Kim (2018) referem, pode ser caracterizada como uma fusão de tecnologias que se destinam a interligar o mundo físico, digital e biológico. O conceito por detrás desta nova abordagem sugere a utilização de tecnologias disruptivas inovadoras que se têm vindo a desenvolver nos últimos anos, grande parte no campo das tecnologias digitais e de produção, nomeadamente IoT (internet of things), CPS (cyber-physical systems), VR/AR (virtual/augmented reality), Manufatura Aditiva, Cloud Computing e robótica. Estas tecnologias permitirão que as empresas mantenham elevados níveis de competitividade e eficiência tendo em conta aquilo que é, hoje em dia, o complexo mercado a nível global. Através da utilização da rede global de comunicações, será possível automatizar as trocas de informação entre sistemas de produção, gestão e manutenção, o que leva a uma alteração na dinâmica das relações entre empresas, fornecedores, clientes e na própria dinâmica da interação entre homem e máquina. Tal como referem Pereira e Romero

(2017), a Indústria 4.0 terá um enorme impacto no setor industrial e de produção, redefinindo as características dos futuros modelos de negócios, da organização do trabalho e da criação de emprego (2,5-7).

2.2. Expectativas da Nova Revolução

Hoje em dia, tal como Reischauer (2018) refere, estamos perante uma crescente adoção de tecnologias digitais por parte de vários tipos de indústrias, tendência que se denomina como Indústria 4.0. Afirma-se que será uma nova revolução tecnológica e que irá ter impacto sobre os aspetos sociais e económicos da sociedade. Para além do mais, como se pode comprovar pela evolução da indústria ao longo dos últimos 250 anos, a cada revolução industrial está associada uma nova tecnologia ou matéria-prima (8).

Nikolai Kondratieff (1935), um economista russo, criou as chamadas ondas de Kondratieff, ciclos longos de dinâmica da economia mundial (50 a 60 anos). Estes ciclos, ou ondas, estão associados a períodos de crescimento económico e desenvolvimento, seguidos de um abrandamento e uma subsequente crise. Cada ciclo de crescimento é, no entanto, dominado por um certo tipo de tecnologia, que, por sua vez, vem trazer mudanças à vida social, política e económica das sociedades (9). O próprio Kondratieff (1935) refere que é durante o período de abrandamento e crise que grande parte das tecnologias que irão ter influência sobre o crescimento do próximo ciclo são desenvolvidas (10). Por outro lado, todas as novas tecnologias desenvolvidas que permitiram ciclos de crescimento e que levaram ao desenvolvimento da sociedade utilizaram novos recursos materiais, ou simplesmente encontravam uma nova solução para a utilização de recursos já existentes (11). Algo que se pode constatar, a partir destas observações, é que o avanço tecnológico é um dos pilares essenciais no desenvolvimento da sociedade, o que faz com que a próxima revolução industrial tenha uma especial importância devido aos avanços nos

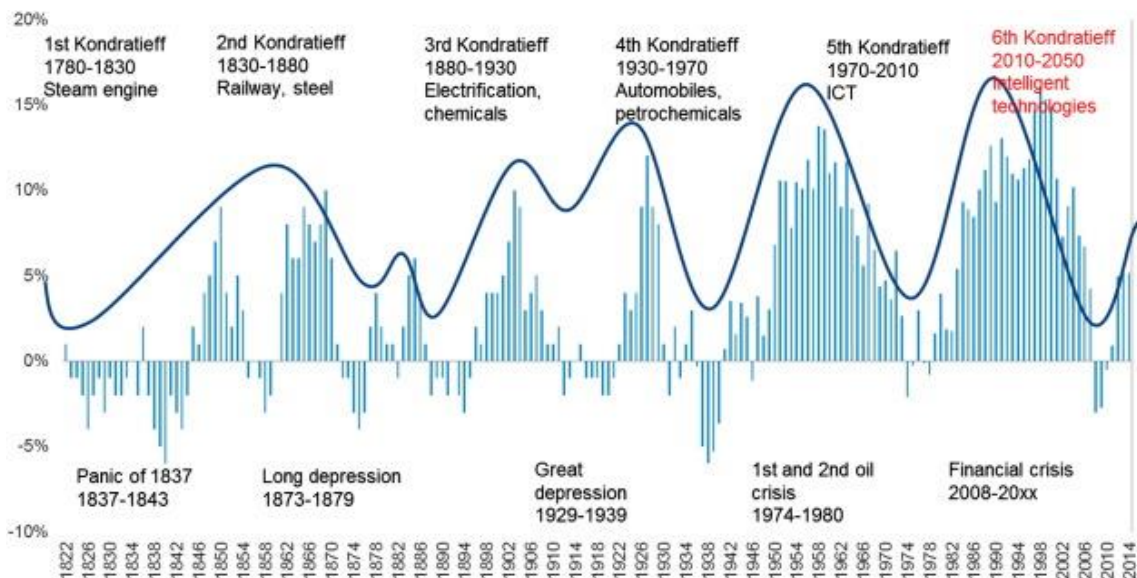


Figura 2 - Ondas de Kondratieff

campos das nanotecnologias, biotecnologias, energias renováveis, eletrónica e tecnologias de informação e comunicação (5,12).

Como refere Horvath (2018), a Indústria 4.0 promete ser a era da inteligência artificial, onde vão prosperar as tecnologias digitais. À medida que estas vão sendo desenvolvidas e descentralizadas, principalmente o acesso a energias renováveis e prestação de serviços digitais, a sociedade consegue reduzir custos e reaproveitar, de forma mais eficiente, os recursos de que dispõe. Tudo indica que estas novas tecnologias, ou esta nova revolução industrial, têm o potencial para dinamizar uma onda de crescimento económico, como as Ondas de Kondratieff preveem, e poderá ser extremamente benéfico se a conseguirmos utilizar como uma solução para criar uma sociedade autossustentável (11).

3. Indústria 4.0

A Indústria 4.0 é um termo que surge na Alemanha em 2011 durante a Feira de Hannover (13) e que tem sido utilizado para descrever a nova revolução industrial, na qual a combinação da digitalização do ambiente industrial, juntamente com tecnologias de informação e comunicação e com a utilização de objetos “inteligentes”, irá revolucionar os métodos de produção industrial modernos. No futuro, os sistemas de produção serão mais eficientes e os próprios produtos controlarão o processo produtivo ao longo da linha de produção. Este conceito pretende capturar a essência da produção individualizada e cruzá-la com os benefícios económicos da produção em massa (14). Contudo, para estes sistemas funcionarem de forma autónoma, são necessárias duas tecnologias chave: a IoT (internet of things) e os CPS (cyber-physical systems). A função destas tecnologias é estabelecer uma interligação entre sensores, máquinas, produtos, linha de produção e até clientes. Desta forma, cada elemento desta rede é autónomo e independente (13). Tal como refere Lu (2017), os CPS serão capazes de monitorizar a atividade dos processos físicos e criar uma cópia digital dos mesmos, num ambiente de simulação, o que permite a tomada de decisões de forma descentralizada. Através da IoT, estes sistemas comunicam entre si e com os agentes humanos envolvidos, em tempo real (15).

No entanto, existem outros fatores que contribuíram para a emergência e importância da Indústria 4.0, nomeadamente fatores sociais, económicos e políticos. Como refere Lasi (2014), estes fatores são a existência de tempos de desenvolvimento mais curtos (períodos de criação e inovação devem ser reduzidos para alimentar a competitividade), a individualização em massa (ao longo dos anos, a tendência para serem os clientes a definirem as condições das negociações tem aumentado o número de produtos individualizados que são comercializados), a flexibilidade dos sistemas (devido à crescente individualização, a flexibilidade dos sistemas de desenvolvimento e de produção torna-se um aspeto crítico naquilo que é a atividade produtiva), a descentralização das organizações (a tomada de decisões tem de ser feita de forma célere, de acordo com as necessidades das entidades, o que leva a que a descentralização do poder dentro das organizações seja uma mais valia na redução do tempo de tomadas de decisão) e a eficiência de recursos (quer por motivos económicos, quer por motivos ambientais, uma melhor utilização e aproveitamento dos recursos que estão disponíveis é um fator essencial à sustentabilidade) (14).

Como tal, a Indústria 4.0 procura estabelecer uma produção auxiliada por tecnologias de informação e comunicação que consiga responder às crescentes necessidades do mercado. Através duma constante troca de informação por parte de máquinas, equipamentos, objetos e seres humanos na linha de produção, a Indústria 4.0 conseguirá oferecer muita flexibilidade ao processo produtivo, permitindo a individualização em massa e a produção de lotes de pequena dimensão. No processo produtivo, a automatização das tarefas, a digitalização e a integração

de informação em tempo real irá reduzir os custos e os tempos de espera, contribuindo para uma maior eficiência e produtividade. Como refere Lu (2017), a Indústria 4.0 pode ser descrita como um processo de manufatura orientado para serviços, flexível, integrado e otimizado, que utiliza tecnologias de ponta, e que se rege por princípios como a interoperabilidade, a virtualização, a descentralização, a capacidade em tempo real, a orientação para serviços e a modularidade (15).

3.1. Internet of Things (IoT)

A IoT, ou Internet das Coisas, em português, caracteriza um ecossistema no qual os objetos e equipamentos nele inseridos estão equipados com sensores eletrónicos e outros aparelhos digitais. Todos os equipamentos ou objetos equipados com IoT serão capazes de reunir e trocar informações uns com os outros, num sistema interligado em rede. Esta tecnologia permitirá avanços significativos na execução e gestão de tarefas em tempo real, e o que a torna possível é a tecnologia RFID (radio frequency identification). Esta tecnologia, aplicada a objetos e equipamentos, é o que permite que as trocas de informação sejam feitas em tempo real, garantindo um fluxo de trabalho o mais eficiente possível, consoante os parâmetros e tarefas programados. Pelos seus benefícios organizacionais, já existem muitas empresas a utilizar esta tecnologia, nomeadamente na gestão de armazéns e da produção, na logística e em centros de distribuição. No entanto, a análise da enorme quantidade de informação que é gerada através da leitura de chips RFID contribui para um melhor entendimento do estado das operações em tempo real, o que possibilita uma possível melhoria dos sistemas (16).

Como refere Zhong (2017), existem casos de utilização de IoT em vários países, nomeadamente na Austrália, Canadá, China, Espanha, EUA, França, Irlanda e Itália, e em vários setores, tais como informação e comunicações, medicina, indústria da produção e de prestação de serviços e até no desenvolvimento de Smart Cities (16).

Smart Factory

Nas fábricas do futuro, uma das componentes essenciais da Indústria 4.0, tudo vai estar interligado. Todos os equipamentos utilizados para a produção (tais como sensores, robots, tapetes transportadores e máquinas), a própria atividade de produção (desde a fase do design, ao planeamento e à execução da produção) e a atividade de manutenção será realizada pela fábrica, de forma autónoma. Isto torna-se possível devido à descentralização dos sistemas e à capacidade de cada um se controlar de forma independente (13). Estas atividades serão apoiadas por sensores e sistemas autónomos que conseguem replicar, em ambiente digital e de simulação, a própria fábrica, contribuindo para uma gestão da produção de forma autónoma (14).

Smart Products

O aparecimento de produtos “inteligentes” é um passo importante na transição para a Indústria 4.0. Os mesmos, equipados com sensores, componentes identificáveis e microprocessadores, conseguem transportar informação sobre o seu estado e as suas características, à medida que percorrem a linha de produção, e comunicá-la, em tempo-real, com os sistemas de produção, efetivamente controlando a produção em si. Esta informação também pode ser analisada para otimizar o processo de design e de manutenção dos objetos ou até da própria linha de produção (13).

Vantagens para os Consumidores

A Indústria 4.0 trará vantagens para a os consumidores que passarão a dispor de um novo modelo de compra. Cada pessoa terá a possibilidade de adicionar funções específicas ao seu produto e, para além disso, será possível encomendar vários produtos, ou apenas uma unidade. Para os consumidores mais indecisos, será possível até modificar certas especificações do produto enquanto este já se encontra em produção, sem custos adicionais. Os Smart Products podem até, num contexto de utilização pessoal, transmitir informações e sugestões ao consumidor sobre a sua própria utilização (13).

3.2. Cyber-Physical Systems

Um Cyber-Physical System, ou CPS, de acordo com Lu (2017), é um mecanismo industrial automatizado através do qual se estabelece uma relação entre as ações realizadas no mundo físico com poder computacional e software de comunicação (15). Monostori (2014) vem enfatizar a ideia de que os CPS podem estar interligados entre si, criando um conjunto de mecanismos que cooperam no processamento e transferências de informação, em rede (17). Através de sistemas mecânicos, eletrônicos, de software e de uma variedade de atuadores e sensores, tais como sensores de pressão, de toque ou de luminosidade, entre outros, o sistema é capaz de estabelecer relações entre o mundo físico e a sua representação virtual, que está a ser feita com recurso a software e capacidade computacional, em tempo real. A simulação digital gera dados e informações relativos à atividade física e as várias componentes do sistema são capazes de comunicar umas com as outras, gerando uma grande quantidade de dados que pode ser analisada e utilizada como forma de gestão dos próprios sistemas. No entanto, a sua complexidade levanta desafios relativos à sua segurança e à sua confiabilidade, o já levou muitas empresas a iniciarem investigações e projetos relativos a CPS, algumas com muito sucesso (16). Este tipo de sistemas, devido à sua dinâmica e complexidade, são capazes de contribuir para os processos de planeamento, design, implementação e manutenção da atividade de produção (15).

Como Zhong (2017) refere, o desenvolvimento e utilização de sistemas CPS tem vindo a crescer em certos países, tais como no Brasil, Canadá, China, Coreia do Sul e EUA, e em determinados setores, nomeadamente na medicina, em sistemas de energia e comunicação e na indústria da produção, dos transportes e da construção (16).

Como referido anteriormente, os CPS têm capacidade para se conectarem e interligarem com outros equipamentos e efetuar trocas de informação, de forma autónoma. No entanto, numa escala maior, os equipamentos ou máquinas que são responsáveis pela atividade de produção transformar-se-ão em Cyber-Physical Production Systems, ou CPPS. Estes sistemas também são autónomos e organizam-se de forma modular e descentralizada, o que facilita a otimização da atividade de produção. Como Monostori (2014) refere, os CPPS permitem a comunicação entre produtos, máquinas e o ser humano, através de interfaces, e são capazes de realizar certas tarefas de forma autónoma (17).

Contudo, Almada-Lobo (2015) sugere que, cada vez mais, os próprios produtos se transformarão em sistemas CPS, capazes de identificar e transmitir o seu estado, a sua localização e as suas necessidades, ao longo da linha de montagem. Neste cenário, os CPPS terão conhecimento sobre as suas capacidades, configurações e necessidades de matéria-prima e de manutenção, à medida que os CPS, ou os novos produtos, vão sendo criados. Desta forma, através de uma troca de informação transparente e integrada num sistema modular e autónomo, os CPPS serão capazes de produzir de acordo com as necessidades dos CPS. Isto cria um fluxo de produção dinâmico, no qual a produção é altamente customizada, o que origina muitos desafios relativos à cadeia de abastecimento. Como Almada-Lobo (2015) refere, num ambiente de Indústria 4.0, a fábrica será uma espécie de mercado entre os CPS e os CPPS. A produção será controlada pelos CPS, que transmitem aos CPPS as suas necessidades, ou seja, as necessidades da produção. Por outro lado, os CPPS tratam de garantir o fornecimento de materiais necessários à produção dos CPS, o seja, garantem que o sistema tem capacidade para produzir de forma eficiente (18).

Monostori (2014) faz ainda uma caracterização das expectativas relativas aos CPS e CPPS, que podem ser definidas por um conjunto de conceitos, tais como a segurança, controlo em tempo real, autonomia (relativa à identificação, organização, comunicação, produção e manutenção), transparência, previsibilidade e eficiência (17).

4. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva é uma tecnologia que surgiu na década de 1980, na altura denominada como prototipagem rápida. Como referem Wong e Hernandez (2012), esta tecnologia vem revolucionar inúmeros setores de atividade, tais como a indústria da produção, a medicina, a ciência e as artes, devido ao facto de ser possível criar protótipos e peças a partir de camadas tridimensionais. Graças a este aspeto, o tempo de desenvolvimento e produção de protótipos foi reduzido, bem como custos associados. No entanto, este processo apenas se torna possível com o desenvolvimento e aperfeiçoamento de três tecnologias anteriores, o design assistido por computador, ou CAD (computer-aided design), a manufatura assistida por computador, ou CAM (computer-aided manufacturing), e o controlo computacional numérico, ou CNC (computer numerical control). O objeto que se quer produzir é criado digitalmente, o que dá origem a um ficheiro CAD. Este é transposto para formato STL, o que dá origem à divisão do objeto em camadas, o que possibilita a sua “impressão”. São estas inovações que, utilizadas em conjunto, possibilitam a existência da manufatura aditiva, ou impressão 3D, termo que também é utilizado atualmente (19). Tal como refere o Comitê Técnico ASTM F42, o processo de manufatura aditiva consiste na união de materiais de forma a criar objetos a partir de dados de modelos tridimensionais por camadas, ao contrário das metodologias de manufatura subtrativa (20).

Inserida no contexto da Indústria 4.0, a manufatura aditiva apresenta-se como uma ferramenta de produção que utiliza métodos inovadores para criar objetos de geometria extremamente complexa, apropriando-se de materiais inovadores e novas formas geométricas. Hoje em dia, já é possível fabricar objetos prontos a utilizar. Esta tecnologia tem sentido avanços significativos no seu desenvolvimento e já se encontra em utilização em vários setores, tais como na indústria da produção, automóvel, aeroespacial e na medicina, devido à qualidade das peças resultantes. Por outro lado, ainda suscita dúvidas quanto à sua utilização para a produção massificada, visto que certos pormenores, tais como a precisão, estrutura, complexidade dos objetos e a própria velocidade da produção ainda não estão ao nível que é esperado. Em certos casos, ainda se recorre à maquinação em CNC para aperfeiçoar o objeto final. É, contudo, de realçar, que a sua utilização constitui uma alternativa aos métodos de produção tradicionais e que o seu contínuo desenvolvimento poderá resolver as questões que possibilitarão uma maior adoção deste método de produção, no futuro (3,19). Como se tem vindo a verificar ao longo das últimas duas décadas, os avanços nos processos de manufatura aditiva têm contribuído nesse sentido. Numa fase mais inicial, a produção variava entre protótipos e peças. Hoje em dia, a produção de ferramentas e de objetos prontos a utilizar apresenta-se como a sua principal tendência (20).

Devido aos avanços tecnológicos que a manufatura aditiva tem vindo a experienciar desde o seu início até aos dias de hoje, existem vários tipos de materiais e técnicas a partir dos quais

se podem produzir objetos. A escolha de um método de produção deve variar consoante o resultado final que se pretende obter.

4.1. Processos

Stereolithography

O processo de **Estereolitografia**, ou **SLA**, foi o primeiro processo de manufatura aditiva desenvolvido, sendo um dos mais utilizados, no campo da prototipagem rápida. O início da produção realiza-se através do endurecimento de um líquido composto por monómeros, ou polímeros, através da aplicação de lasers com frequências ultravioleta. Esta técnica de fotopolimerização é denominada de cura ultravioleta e permite a criação de objetos com partículas de cerâmica, suspensas no material polimérico. A primeira camada de material é produzida em cima de uma base e, após solidificar, a base desce, ajustando-se para a criação da próxima camada (19,20).

À medida que as várias camadas são sobrepostas, o objeto vai ganhando forma até, eventualmente, estar concluído. O líquido que sobra no final do processo é escoado e reutilizado para a produção de um novo objeto. Os avanços nesta tecnologia já permitem a criação de camadas com espessuras de até 10 μ m, o que melhora a precisão e acabamento dos objetos produzidos, e que também é possível a criação de objetos com utilizando polímeros, cerâmicas e metais. Para além do mais, é possível criar objetos com vários tipos de materiais em simultâneo. Neste caso, quando a produção atinge uma camada que requer outro tipo de material, o líquido inicial é escoado e é inserido outro líquido com as características necessárias (19,20).

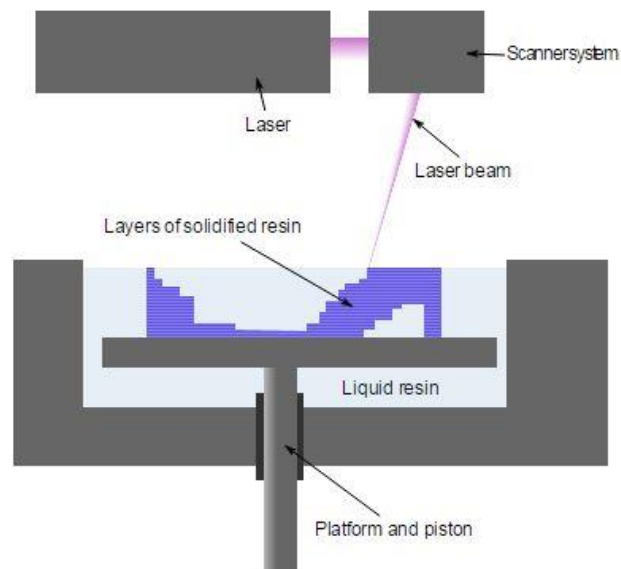


Figura 3 - Esquema do processo SLA

Existe, no entanto, uma alternativa mais económica à utilização do processo SLA. O sistema de lasers presente no processo SLA utiliza apenas um laser para efetuar o caminho de produção de cada camada, o que demora o seu tempo a concluir. No entanto, este processo semelhante, conhecido como **Digital Micromirror Device**, ou **DMD**, tem a capacidade para expor uma camada inteira à luz, duma só vez. Desta forma, o processo DMD é uma alternativa mais rápida e mais barata ao processo SLA, visto que a velocidade de impressão de camadas é superior e o equipamento é mais barato (20).

Fused Deposition Modelling

A **Fused Deposition Modelling**, ou **FDM**, é uma técnica de manufatura aditiva muito eficaz e que utiliza polímeros para a criação de objetos, entre os quais PC (policarbonato), ABS (acrilonitrila butadieno estireno), PPSF (polifenilssulfona), PC-ISO (policarbonato com biocompatibilidade) e misturas de PC com ABS. Criado na década de 1980 e melhorado até aos dias de hoje, o processo consiste no aquecimento e liquefação do material polimérico e na sua extrusão, através de filamentos aquecidos com cerca de 0,25mm de espessura, para cima de uma base de suporte. O material arrefece e forma-se uma camada, enquanto a base se ajusta para a criação da próxima. Comparativamente a outras técnicas de manufatura aditiva, a FDM apresenta-se como sendo um método de produção menos dispendioso, visto que tanto os equipamentos, como os materiais, são mais baratos, e não é necessária a utilização de resinas nem de produtos químicos para fazer o tratamento dos produtos (19,20).

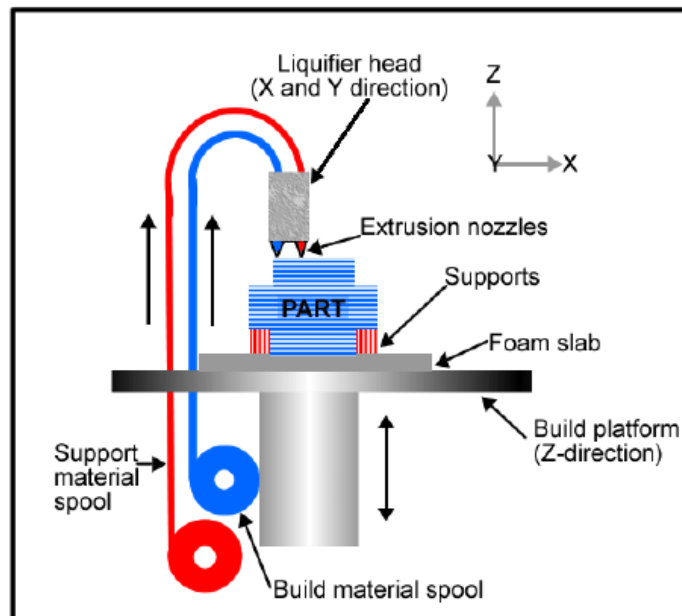


Figura 4 - Esquema do processo FDM

Estas características contribuem, de forma benéfica, para a relação entre a produção e o custo das peças. No entanto, como Wong e Hernandez (2012) referem, a desvantagem da utilização

desta técnica é o facto da espessura do eixo Z, ou eixo vertical, ser cerca de 0,25mm, o que significa que é necessário a utilização de algum tratamento extra quando são necessárias superfícies extremamente suaves. Outra desvantagem relaciona-se com o facto de ser uma técnica que pode demorar muito tempo, por vezes dias, até concluir a produção de objetos muito grandes ou extremamente complexos na sua estrutura (19). No entanto, o desenvolvimento desta tecnologia permitiu a criação de sistemas com várias extrusoras, que conseguem fabricar objetos utilizando diferentes tipos de materiais, em simultâneo (20).

Para a criação de objetos em cerâmica, pode ser utilizado um processo conhecido por **Robocasting**, que apresenta características semelhantes ao método FDM, à exceção do material que é utilizado. O material cerâmico é extrudido em filamentos num estado viscoso, capaz de aguentar a forma e endurecer numa questão de instantes, entre 10 a 15 segundos, aproximadamente. Esta janela de tempo dá oportunidade à base sobre a qual está a ser fabricado o objeto para descer e ajustar-se para a criação da próxima camada. Um aspeto importante a considerar na utilização desta técnica é o estado do material cerâmico, visto que a mistura não pode ser nem muito líquida, nem muito densa. Tal como Guo e Leu (2013) referem, uma pasta com níveis adequados de consistência consegue produzir filamentos com geometria muito precisa, o que aumenta a qualidade dos objetos produzidos (20).

3DP

Esta técnica de manufatura aditiva, chamada **Three-Dimensional Printing**, ou **3DP**, foi criada pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) e é caracterizada pela utilização de agentes ligantes à base de água que reagem com um granulado à base de amido. A primeira camada é criada sobre uma base, que se ajusta verticalmente quando cada camada é concluída. Quando o material líquido entra em contacto com o granulado, este solidifica, dando origem às várias camadas que compõem o objeto. Na parte final do processo, o objeto é removido da caixa de produção e é efetuada uma limpeza para remover o excesso de granulado (19,20).

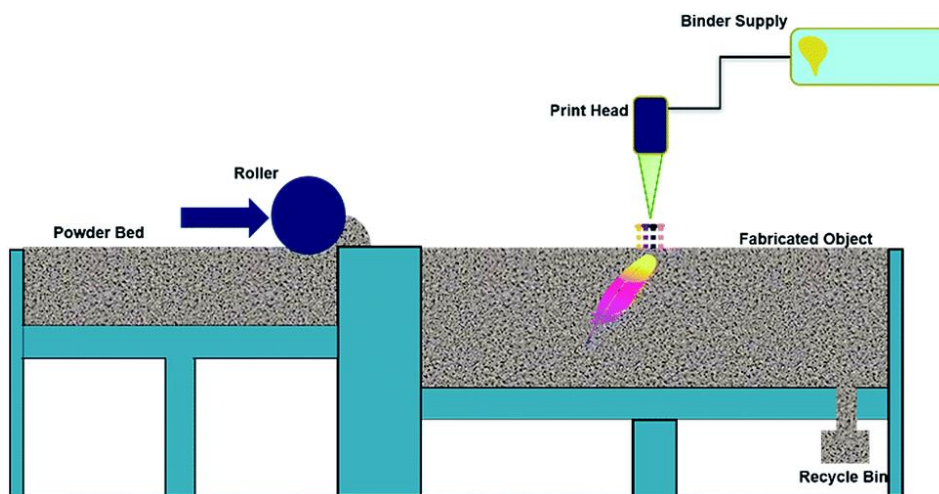


Figura 5 - Esquema do processo 3DP

Esta é uma técnica muito versátil no que toca à quantidade de materiais que se podem utilizar, sendo que se consegue fabricar objetos numa grande variedade de polímeros, cerâmicas, metais e compósitos metálicos e cerâmicos, desde que a mistura final utilizada para a produção apresente um certo nível de viscosidade, adequado à sua deposição sem sofrer deformação. Uma das suas desvantagens, contudo, é a estrutura porosa dos objetos resultantes, que demonstra que os mesmos necessitam de tratamento posterior, de modo a serem funcionais. Este tratamento pode ser feito através de sinterização ou através de infiltração de material. (19,20).

Selective Laser Sintering

O processo de **Sinterização Seletiva a Laser**, ou **SLS**, é um processo de manufatura aditiva que cria objetos através da utilização de lasers e granulados, por camadas. A primeira camada é criada sobre uma base cheia de granulado, que se vai ajustando à medida que o objeto é produzido. Essa camada de material sólido é formada a partir do direcionamento de lasers de dióxido de carbono, capazes de derreter e unir o material granulado. De seguida, é depositada outra camada de granulado e os lasers voltam a ser aplicados, criando a camada seguinte, e assim sucessivamente, até o objeto final estar concluído. O excesso de granulado pode ser reaproveitado para a produção de outros objetos.

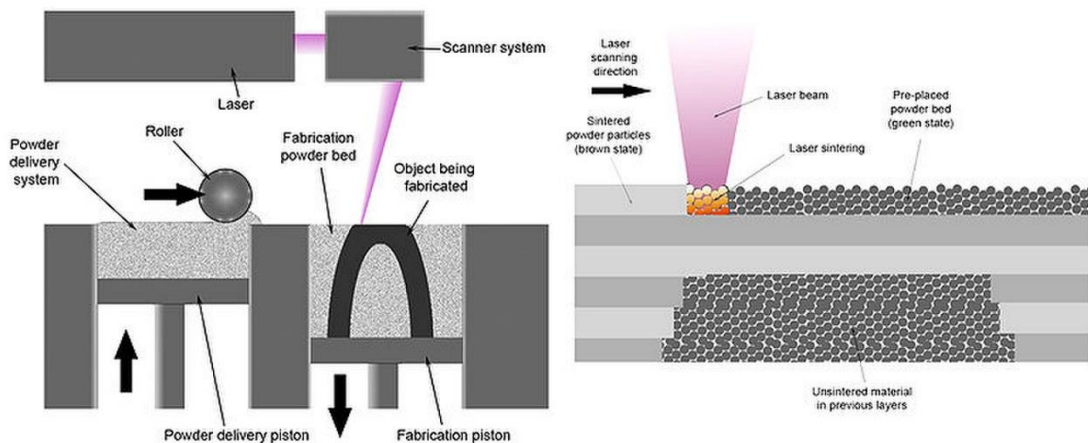


Figura 6 - Esquema do processo SLS

Esta técnica de manufatura aditiva é das mais versáteis, sendo que pode ser utilizada para a produção de peças em polímeros, ceras, metais, cerâmicas e compósitos poliméricos, cerâmicos e metálicos. Uma das vantagens da utilização de SLS é o facto de não serem necessárias estruturas de suporte à medida que o objeto é fabricado, visto que o mesmo é criado numa “cama” de material granulado. No entanto, uma das suas desvantagens é a

precisão das camadas, que varia consoante as características específicas das partículas do material utilizado. Outro aspeto menos positivo, que apenas ocorre durante a produção de objetos com metais, é o facto de não poder existir oxidação de material (metal) durante a produção, o que causa variações da temperatura de fusão. Esta particularidade pode ser evitada ao criar uma atmosfera de gás inerte que envolva o material, salvaguardando essa eventualidade (19,20).

Existe, porém, uma técnica semelhante à SLS, conhecida como **Fusão Seletiva a Laser**, ou **SLM**. A produção de objetos decorre de forma igual, sendo que os processos utilizados em ambas são iguais, à exceção do grau de intensidade do laser utilizado, que se apresenta como a única diferença entre os dois processos. Este aumento da intensidade do laser aumenta a qualidade das propriedades mecânicas dos objetos resultantes e os mesmos não necessitam de tratamento posterior, duas grandes vantagens deste método, comparativamente com a técnica SLS. No entanto, esta maior intensidade também trás desvantagens ao processo, que têm que se ter em conta. A utilização de mais energia faz com que esta seja mais difícil de controlar. Isto faz com que, por vezes, os objetos contenham deformações, tensões residuais estruturais e “balling”, termo utilizado para denominar a formação de bolhas ao redor do material fundido (20).

Electron Beam Melting

A técnica de **Fusão com Feixe de Eletrões**, ou **EBM**, tem características semelhantes à anterior, a SLS, sendo que as principais diferenças são o tipo de feixe luminoso e os materiais utilizados. Durante este processo, o material granulado é depositado sobre uma base. De seguida, feixes de eletrões percorrem o caminho de produção para solidificar o material e criar a primeira camada. Quando esta está concluída, a base desce, ajustando-se para a criação da próxima camada. É, então, reposta outra camada de material granulado e o processo repete-se até ao objeto final estar concluído. No entanto, a EBM destaca-se pela produção numa câmara de vácuo, fator que elimina o problema da oxidação de metais, comum na SLS. Através deste processo é possível criar objetos em vários tipos de metais e ligas metálicas. No entanto, a particularidade desta técnica de manufatura aditiva é a sua utilização para a produção de peças no espaço, devido à necessidade de utilização de câmaras de vácuo. Uma das vantagens da produção de objetos, utilizando esta técnica, são a resistência, densidade e qualidade das peças. Quando comparada aos processos SLS e SLM, a EBM também consegue produzir objetos mais rapidamente, devido à sua alta velocidade e capacidade energética. Contudo, o acabamento final dos objetos resultantes é inferior (19,20).

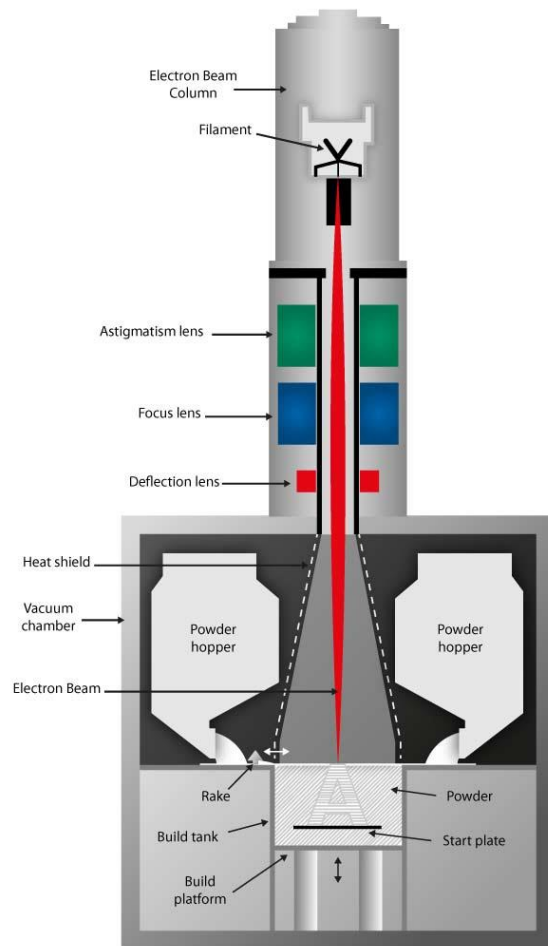


Figura 7 - Esquema do processo EBM

Laser Metal Deposition

A técnica de **Deposição de Metal a Laser**, ou **LMD**, é uma técnica inovadora que permite a criação de peças de raiz ou a reparação de peças existentes, utilizando metal. Também se pode denominar por **Laser Engineered Net Shaping**, ou **LENS**. Como o nome indica, este método é utilizado quando se quer produzir com diferentes tipos de metais, tais como ferro inoxidável, titânio, alumínio, vanádio e ligas metálicas à base de níquel e cobre. O metal é ejetado, por extrusoras, em forma de granulado, à medida que a máquina percorre o caminho de produção.

Enquanto é depositado, a incidência de um laser de alta potência funde as partículas metálicas sobre o material existente, o que vai dando forma ao objeto. Todo este processo ocorre dentro de uma atmosfera rica em argon, um gás nobre que evita a oxidação do metal. Algumas vantagens relacionadas com a utilização desta técnica são a criação de peças que não necessitam de tratamento posterior, tal como na SLM, e a elevada precisão que se consegue atingir através da utilização de zonas de fusão extremamente reduzidas. A grande vantagem, que é extremamente disruptiva, é poder ser utilizada como uma técnica de reparação de objetos já existentes, como referido anteriormente. No entanto, uma desvantagem relacionada com esta técnica recai sobre possíveis tensões residuais dentro da estrutura dos objetos produzidos, nomeadamente em processos de alta precisão. Isto pode acontecer devido ao constante aquecimento e arrefecimento irregular a que os objetos estão sujeitos (19,20).

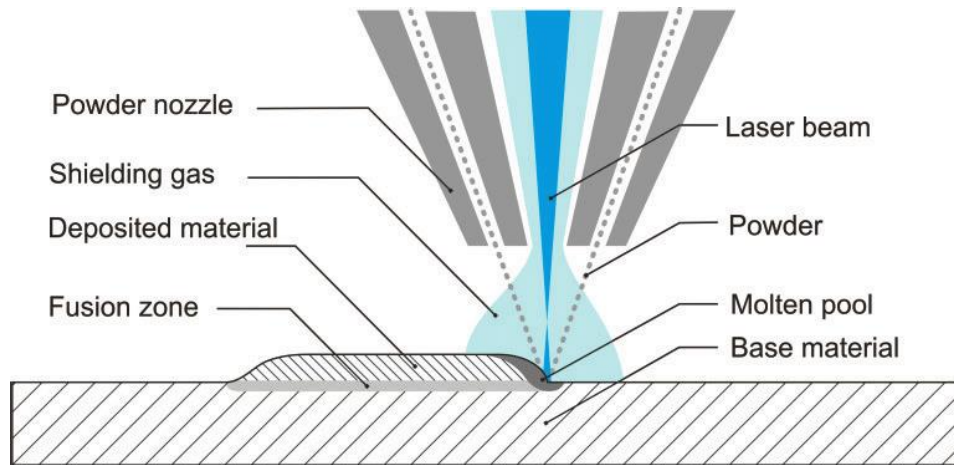


Figura 8 - Esquema do processo LMD

Laminated Object Manufacturing

A técnica de **Manufatura de Objetos Laminados**, ou **LOM**, é caracterizada pela utilização de tecnologias de manufatura aditiva e subtrativa. Como o nome indica, a produção de objetos é feita por laminados, ou camadas, que se encontram em formato de rolo, para a alimentação do equipamento. Para a criação de objetos utilizando este método, os materiais disponíveis são metais, materiais compósitos, polímeros e papéis. À medida que o material vai sendo desenrolado, um laser de dióxido de carbono corta as silhuetas da camada respetiva. De seguida, um rolo efetua pressão sobre a camada, o que acontece sob temperaturas muito elevadas, contribuindo para a união das várias camadas (19,20).

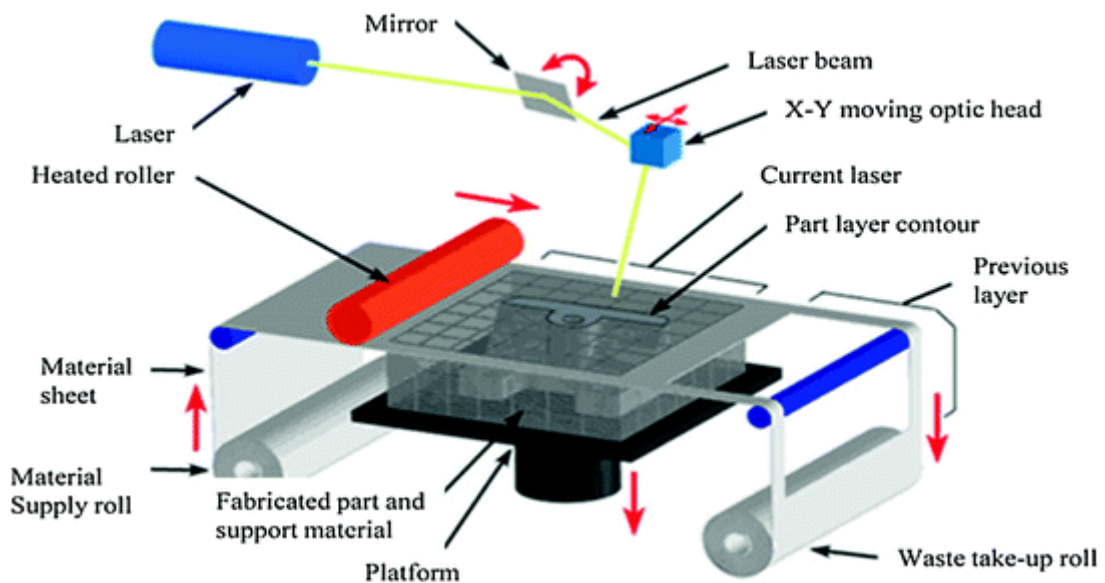


Figura 9 - Esquema do processo LOM

A temperatura e a pressão efetuadas são essenciais para a união do material. A LOM é uma técnica que apresenta várias vantagens, nomeadamente, a produção de baixo custo e de peças de grandes dimensões, a velocidade da produção (devido ao laser cortar apenas o contorno de cada camada), os objetos não sofrem deformações e não são necessárias estruturas de suporte durante o processo. Contudo, apresenta, também, algumas desvantagens. Em relação à matéria prima utilizada, esta não é toda aproveitada, ou seja, existe desperdício de material, uma desvantagem que provém da utilização de técnicas de manufatura subtrativa (19,20).

Em termos estruturais, certos tipos de geometrias mais complexas não são possíveis de ser fabricadas, pelo facto de não utilizar estruturas de suporte. Ao mesmo tempo, a qualidade do acabamento dos objetos fabricados está diretamente relacionado com a espessura das camadas de material, o que dificulta a produção com acabamentos de alta qualidade (19,20).

Multi-Jet Modelling

Este processo de manufatura aditiva, conhecido como **Multi-Jet Modelling**, ou **MJM**, apresenta semelhanças aos processos de impressão com jatos de tinta, e utiliza materiais poliméricos para produzir peças e objetos, nomeadamente fotorpolímeros, materiais que alteram a sua composição quando expostos a frequências ultravioleta. O material é expelido por vários jatos e é curado por uma luz ultravioleta, no momento em que é depositado. A base onde é criado o objeto vai descendo à medida que cada camada é concluída, ajustando-se até o objeto estar terminado. Com a utilização deste processo, é possível atingir níveis de produção que apresentam uma boa relação entre custo e eficiência e, também, produzir objetos mais rapidamente (20).

No entanto, existe um processo semelhante ao MJM, com o nome de **Jetted Photopolymer**, ou **Polyjet**. O Polyjet funciona de forma semelhante ao MJM, sendo que apresenta ligeiras diferenças relativamente ao método de produção. A espessura de cada camada é um dos pontos fortes desta técnica, visto que consegue atingir valores de 16µm, contribuindo para a precisão dos objetos produzidos. Para além disso, alguns objetos com certo tipo de geometrias mais complexas podem necessitar de estruturas de suporte para serem fabricados. Estas são compostas por uma espécie de gel polimérico, que pode ser removido, no final do processo, com a passagem de água. No entanto, uma das desvantagens deste método é a diminuição da qualidade da estrutura dos objetos, o que faz com que seja utilizado, preferencialmente, para a produção de protótipos. Outros processos, tais como SLA ou SLS, produzem peças com qualidade superior (19,20).

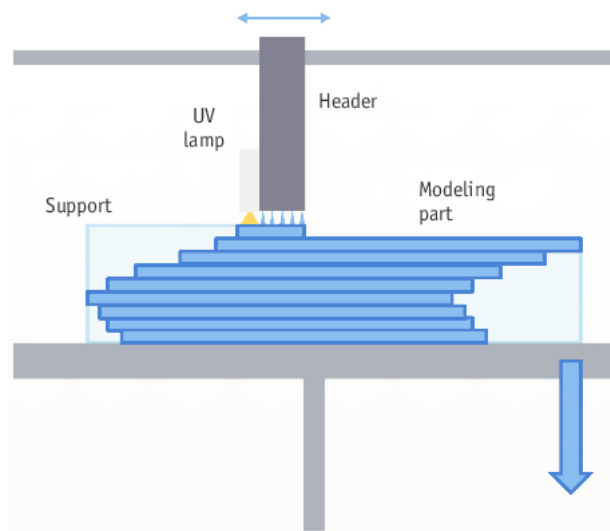


Figura 10 - Esquema do processo MJM

Continuous Liquid Interface Production

O **Continuous Liquid Interface Production**, ou **CLIP**, é um processo de produção inovador, diferente de todos os métodos previamente descritos. É, realmente, uma verdadeira revolução dentro da própria manufatura aditiva, ao ser o primeiro através do qual é possível criar objetos de forma contínua, ao contrário de todos os outros, que produzem objetos camada por camada. Esta característica faz com que exista uma redução significativa do tempo de produção de cada objeto, devido à eliminação de várias etapas de reposição de peças e recolocação de material no processo. A utilização do processo CLIP é indicada para a criação de objetos poliméricos (21,22).

Esta produção de forma contínua contribui para a eliminação do “efeito de escada”, que existe nos processos de manufatura aditiva que produzem por camadas. O “efeito de escada” refere-se às irregularidades na superfície final dos objetos, que se assemelham a uma escada, e é causado pela espessura das camadas criadas. Quanto mais espessa for a camada, maior será o efeito, ou seja, o objeto terá uma superfície com mais irregularidades (23).

O processo CLIP retira as camadas do processo produtivo. A solidificação do material dá-se numa zona de polimerização chamada zona morta, ou “dead zone”. Neste local, através da incidência de lasers numa janela de oxigénio permeável, são criados radicais livres fotopoliméricos. Estes radicais reagem com o oxigénio libertado e com o material em estado líquido nesta zona, o que torna possível a fabricação do objeto à medida que a plataforma de suporte é elevada e a renovação de material na zona morta, em simultâneo, como se pode verificar na figura 11, eliminando, assim, o “efeito de escada”. Esta característica contribui para a qualidade da superfície final dos objetos e para a velocidade de produção, que sofre um aumento significativo comparativamente aos métodos de manufatura aditiva por camadas (23).

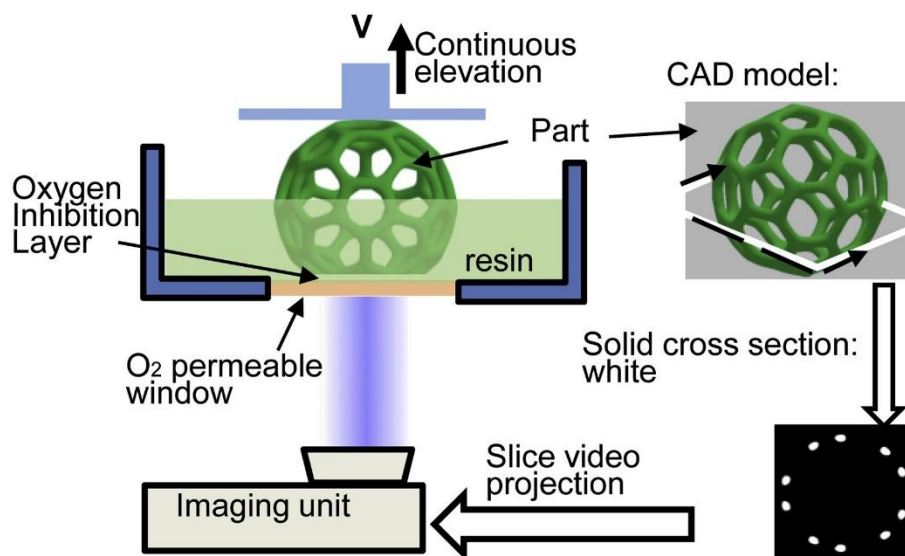


Figura 11 - Esquema do processo CLIP

O processo é iniciado quando a resina, um fotopolímero em estado líquido ou viscoso, é adicionada à caixa de produção, onde fica a repousar. De seguida, a plataforma que irá suportar o objeto é mergulhada até à zona morta, ou “dead zone”. Na parte inferior da caixa de produção encontra-se uma janela permeável de oxigénio. Esta janela, em conjunto com o direcionamento de lasers, criam as condições necessárias para que a solidificação da resina seja possível. A restante resina que envolve essa camada permanece em estado líquido durante o processo. Os lasers vão-se ajustando consoante a complexidade e estrutura do objeto à medida que a plataforma é erguida lentamente, até o objeto final estar concluído. As vantagens da utilização do método CLIP incluem a sua velocidade de produção, que é muito mais elevada do que os outros métodos de manufatura aditiva e é capaz de atingir tempos de produção entre 2 a 10 minutos por objeto, para objetos de pequena dimensão, e a criação de objetos com alta precisão estrutural, com dimensões de até $2,3\mu\text{m}$ (21).

É de salientar que, neste processo, um dos fatores essenciais à produção é a velocidade de elevação da plataforma que serve de base para o objeto. Tal como He et al. (2019) referem, a velocidade de elevação da plataforma é diretamente proporcional à qualidade do objeto produzido. Desta forma, se a velocidade for excessiva, o material que é curado não consegue unir-se em condições. Se a velocidade for inferior à necessária, o material acaba por aderir à janela de oxigénio permeável, o que não é suposto acontecer (22).

High-Resolution Electrohydrodynamic Direct Printing

O termo **High-Resolution Electrohydrodynamic Direct Printing**, ou **EHD**, refere-se a um processo de manufatura aditiva capaz de criar estruturas bidimensionais e tridimensionais (2D/3D) em escalas extremamente pequenas (micro - μm ; nano - nm). Relativamente aos processos tradicionais, tais como SLA, FDM, EBM e SLS, esta técnica apresenta uma resolução superior, ao conseguir diminuir o diâmetro do jato de impressão para menos de $50\mu\text{m}$. Esta particularidade é conseguida devido ao facto de existir um campo elétrico que envolve o bocal por onde é ejetado o material, o que dá origem a um cone de Taylor. Este cone possibilita a ejeção de filamentos com diâmetro inferior ao do bocal, o que contribui para a resolução e qualidade das peças obtidas. Por outro lado, se não for aplicada voltagem, o material tende a ser depositado em gotas. (24,25).

Este processo pode criar objetos a partir de polímeros, tintas com nanopartículas metálicas, materiais biológicos e metais com temperaturas de fusão baixas. O material é alimentado através de uma seringa, onde é aplicada uma força através de um sistema pneumático, criando a pressão necessária para o material fluir. A envolver a seringa encontra-se um sistema de aquecimento, que permite aquecer o material até cerca de 196°C . À medida que o material começa a ser depositado, é aplicada uma carga elétrica de alta voltagem ao material e ao eletrodo que suporta o substrato onde será depositado o material. No bocal da seringa, devido

à voltagem aplicada ao material, surge o cone de Taylor, referido anteriormente. Estas condições são ajustadas consoante o resultado pretendido e o material começa, então, a ser depositado, seguindo o caminho programado. Ao longo do processo, um sistema de temperatura de alta precisão e uma câmara de alta resolução acompanham a deposição de material, de modo a garantir um melhor controlo sobre o mesmo (24).

Este processo demonstra ser extremamente complexo a nível tecnológico, sendo que o resultado final das peças obtidas pode variar consoante a pressão aplicada ao material, a voltagem, a distância entre a extrusora e o substrato, a velocidade de adição, a dimensão do bocal e a viscosidade do material (25). Embora esta tecnologia esteja sujeita a maior desenvolvimento, mas já demonstra um grande potencial de inovação nos setores biomédico (fabricação de nano-fibras e nano-tecidos), farmacêutico (administração de fármacos), cosmético (implantes), microeletrónica (sensores e baterias) e robótica (24,26,27).

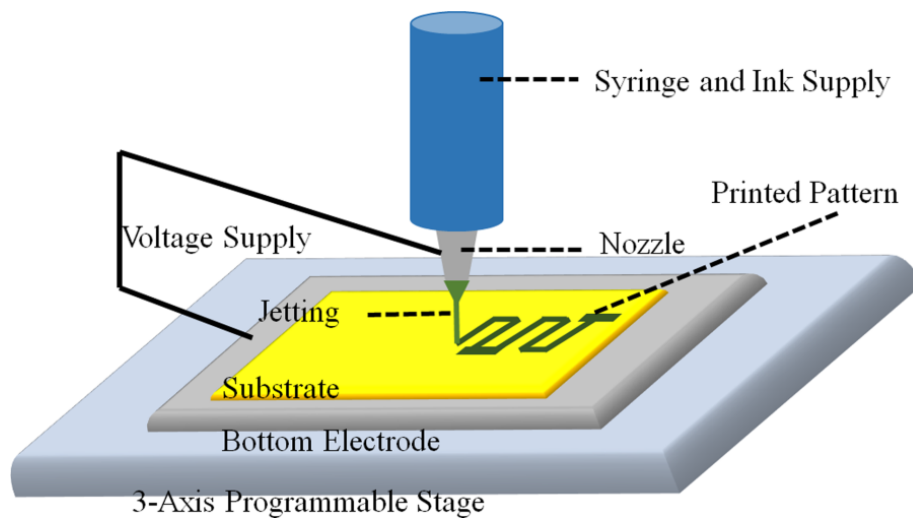


Figura 12 - Esquema do processo EHD

4.2. Novos Materiais

Com o desenvolvimento de novas técnicas de manufatura aditiva, que permitem a utilização de recursos de formas inovadoras, surgem, também, novos tipos de materiais, que procuram responder a vários tipos de necessidades do ser humano. Estes adequam-se a uma nova realidade de produção e proporcionam um novo leque de possibilidades de fabricação.

Metal Líquido Condutor

O metal, um dos materiais mais usados pelo ser humano, para ser utilizado em manufatura aditiva, é transformado num granulado ou numa espécie de uma mistura pastosa. É possível criar objetos metálicos com esta tecnologia utilizando alumínio, titânio ou aço inoxidável, entre outros. Este tipo de produção veio melhorar a característica de tensão do material e veio alterar a microestrutura do interior dos objetos metálicos resultantes, comparativamente aos métodos tradicionais de produção, o que levou a comunidade científica a demonstrar o seu interesse no desenvolvimento de novas investigações sobre a microestrutura, tratamento térmico e composição dos objetos resultantes. Como refere Dilberoglu (2017), para uma utilização eficiente do processo de manufatura aditiva com metal, os avanços tecnológicos devem contribuir para que se reduza o custo da produção, que se aumente a velocidade da produção, que se melhore a propriedade de resistência à tensão e que exista um aumento na qualidade dos acabamentos e na homogeneidade da microestrutura dos objetos (3).

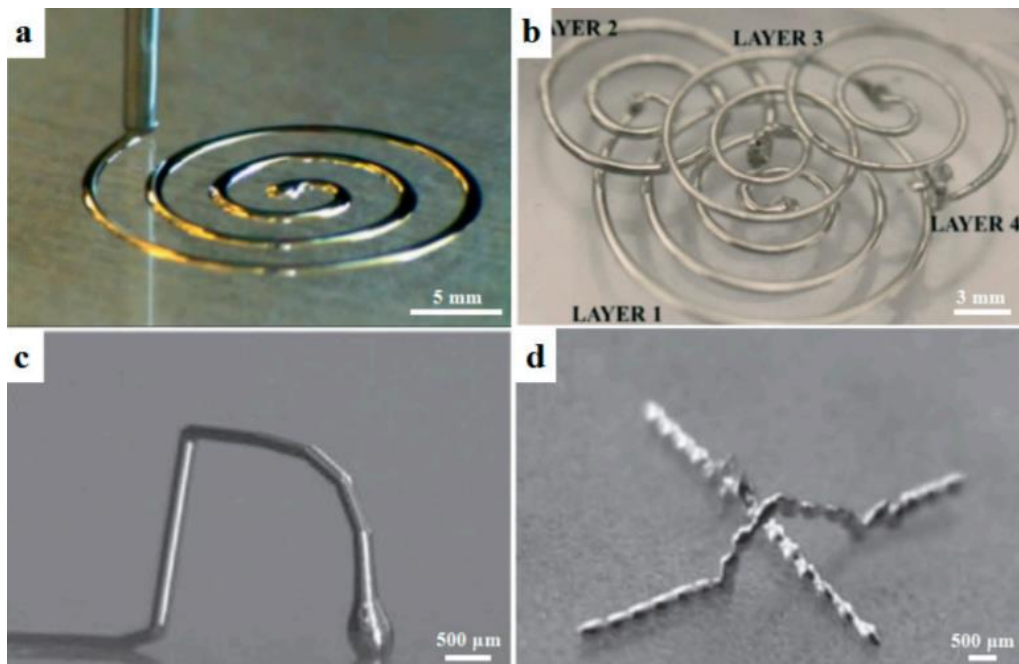


Figura 13 - a) Manufatura direta com metal líquido à base de gálio e índio; b) Recriação, com autorização de John Wiley and Sons, Copyright 2013, de micro canais em 3D com metal líquido como base; c, d) Recriação, com autorização de John Wiley and Sons, Copyright 2013, de estruturas 3D condutivas a partir de metal líquido.

No entanto, já se explora, também, a utilização de metal líquido na manufatura aditiva, utilizando técnicas semelhantes a impressão a jato e de extrusão, graças à possibilidade de produção em escalas muito reduzidas (micro - μm ; nano - nm) e à sua excelente condutividade. Outra característica impressionante relativamente à utilização de metais líquidos é o seu ponto de fusão. Entre muitos tipos de misturas possíveis, certas misturas, tais como metal líquido à base de gálio, apresentam uma temperatura de fusão entre 15°C e 16°C . Outra mistura em particular, metal líquido à base de gálio e índio, pode ser extrudida à temperatura ambiente e pode criar estruturas bidimensionais ou tridimensionais (2D/3D). O metal líquido, por ser condutivo, é extremamente importante para a criação de peças eletrónicas de pequena escala, tais como sensores, eléctrodos, entre outros. Para além dos materiais acima referidos, gálio e índio, podem ser utilizados outros metais, tais como ouro, prata ou cobre (26).

Outros Materiais Condutores

A classe de metais líquidos apresenta certas características que são inovadoras no que toca à manufatura aditiva. No entanto, os produtos resultantes não apresentam boas características em relação à flexibilidade ou elasticidade. Existem, no entanto, outros materiais que apresentam características de condutividade eléctrica e que demonstram características elásticas, tais como o carbono (através de nanofibras ou nanotubos) e o grafeno (uma forma avançada de carbono). Estes materiais são utilizados juntamente com certos tipos de polímeros, tais como ácido polilático (PLA) ou sulfonato de poliestireno (PSS), de forma a criar estruturas elásticas condutivas, capazes de receber estímulos ou transmitir diferentes sinais eléctricos. Um exemplo de um objeto criado com este tipo de materiais é um par de luvas que tem a capacidade de enviar impulsos eléctricos consoante a forma como o utilizador mexe a mão. Estes impulsos geram conjuntos de informação que são traduzidos para gráficos, em tempo real (26).

Também estão a ser realizadas investigações na fabricação de microbaterias através de métodos de manufatura aditiva. Estas microbaterias apresentam características que podem vir a melhorar a capacidade de armazenamento de energia através duma utilização eficiente do espaço disponível. Existem exemplos de microbaterias produzidas com cerca de $30\mu\text{m}$ de largura e que exibem boa densidade energética (9.7 J/cm^2) e potência (2.7 mW/cm^2). Estas microbaterias, em específico, foram criadas utilizando um ânodo de lítio, titânio e oxigénio e um cátodo de lítio, ferro, fósforo e oxigénio. Posteriormente, foi possível aumentar a estabilidade do desempenho destas microbaterias através da adição de grafeno tanto ao ânodo como ao cátodo. Outro exemplo de um tipo de microbateria foi a partir de lítio, manganês, ferro, fósforo e oxigénio, revestido a carbono. Esta microbateria, em específico, apresentou uma boa de condutividade eléctrica, alta capacidade e bom desempenho eletroquímico (26).

Materiais Inteligentes

Os avanços na manufatura aditiva e nos materiais permitiram a incorporação dos chamados materiais “inteligentes” no processo produtivo. Estes variam entre ligas metálicas (shape memory alloys - SMA) e ligas poliméricas (shape memory polymers - SMP). Ambas as ligas possuem a uma característica chamada memória de forma, ou seja, o objeto pode ser sujeito a forças ou estímulos que alteram a sua forma inicial. Contudo, o objeto continua a ter capacidade para regressar à forma inicial. Isto deve-se às suas propriedades de elasticidade, resistência à temperatura e reação a vários estímulos, tais como diferentes níveis de pressão, temperatura, luminosidade e humidade. Estes materiais já são utilizados hoje em dia em várias indústrias, sendo que os SMA são utilizados em implantes biomédicos ou dispositivos eletromecânicos e os SMP são mais utilizados na engenharia médica, indústria têxtil e joalheria. Uma das mais recentes utilizações de SMP é na robótica, nomeadamente na criação de ligas poliméricas que sejam capazes de receber estímulos elétricos e, a partir dos mesmos, alterar a sua forma conforme pretendido (articulações robóticas). No fundo, o interesse que certos setores estão a demonstrar está a contribuir para a o desenvolvimento e utilização destes materiais inteligentes (3).

Hidráulicos e Eletrónicos

Os avanços feitos na manufatura aditiva levaram a descobertas impressionantes relativamente à produção utilizando vários materiais. Através de um processo semelhante a Fused Deposition Modelling, ou FDM, é possível fabricar objetos utilizando sólidos e líquidos em simultâneo. Esta técnica é especialmente importante no que toca à fabricação de peças hidráulicas e robóticas, visto que as mesmas podem ser produzidas duma só vez. Graças a isto, podem ser criados sistemas funcionais prontos a utilizar, sem ser necessário montar peças ou componentes adicionais. Para além do mais, devido à introdução de substâncias condutoras no processo de produção, já é possível produzir objetos com circuitos eletrónicos no seu interior, tais como circuitos luminosos, sensores tácteis ou baterias. Tal como refere Dilberoglu (2017), o resultado da investigação nesta área da manufatura aditiva é muito promissor e demonstra que a mesma pode vir a tornar-se na principal forma de produção de Smart Objects, em vários setores, visto que, desta forma, se produzem os objetos e as suas componentes eletrónicas com apenas um processo (3).

Materiais Especiais

A manufatura aditiva tem uma grande importância no contexto da Indústria 4.0, e é nesse sentido que a investigação realizada por parte da comunidade científica tem recaído, em parte, sobre a utilização de diferentes tipos de materiais para abranger diferentes setores da

sociedade. Os materiais que têm sido alvo de investigação contínua são o cimento (para a indústria civil), os têxteis (para a indústria da moda e produção de vestuário), componentes comestíveis (para a indústria da produção de alimentos) e até pó lunar (para o desenvolvimento de colónias espaciais). No entanto, existem dificuldades a ultrapassar no caso da manufatura de componentes comestíveis, tais como a durabilidade e degradação dos alimentos e a sua velocidade de produção. No caso da utilização do pó lunar, a ideia é poder construir colónias em Marte recorrendo a técnicas de manufatura aditiva e utilizando materiais que estão no terreno, diminuindo a quantidade de material que é necessário transportar nas viagens espaciais. Como Dilberoglu (2017) refere, a investigação sobre manufatura aditiva tem vindo a comprovar o seu potencial e aplicabilidade futura, podendo vir a revolucionar os setores acima referidos (3).

4.3. Processos de Nova Geração

Concrete Printing

A manufatura de estruturas, tais como edifícios ou pontes, é uma realidade dos dias de hoje, tendo em conta os avanços feitos no campo da manufatura aditiva, ou “impressão 3D”, em cimento. Esta tecnologia tem vindo a ser desenvolvida desde 1997, onde as primeiras tentativas de criar estruturas com cimento incorporavam técnicas de SLA e FDM. Como tal, actualmente, as técnicas existentes variam entre derivações dos dois processos acima mencionados, adequadas para a manufatura em grande escala. A escolha sobre o método a utilizar para um determinado projeto deve ser feita tendo em conta o tipo de projeto e as características do material a utilizar (28,29).

Um dos processos com melhores resultados é conhecido como **Contour Crafting**, ou **CC**, e foi tornado público em 2004. Neste processo, que se assemelha ao processo FDM, uma pasta de cimento viscosa é extrudada por um bocal e é uniformizada com a ajuda de espátulas, que se localizam na própria extrusora. Este mecanismo foi criado para replicar a ação de ferramentas de construção, capazes de alinhar o material colocado. Devido à variedade de ferramentas de aperfeiçoamento do material e ao facto de ser auxiliada por CAD/CAM, esta técnica é capaz de fabricar geometrias extremamente complexas. Durante o processo de manufatura, as superfícies, ou o contorno, do objeto são produzidas em primeiro lugar. Após o material ter repousado e solidificado, procede-se ao preenchimento do seu interior através da deposição de mais cimento, preenchendo o seu interior (30).

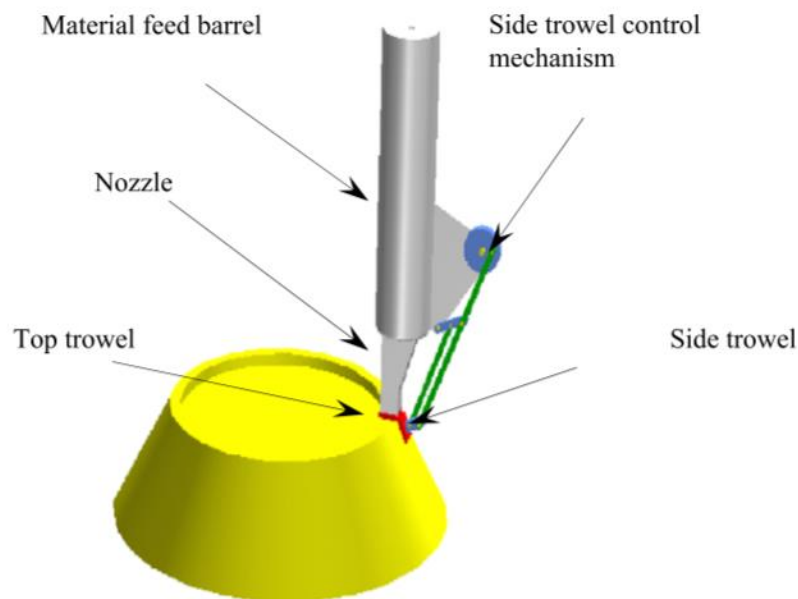


Figura 14 - Esquema da extrusora do processo CC

Este método é utilizado para fabricar estruturas em grande escala e torna-se possível através da instalação de um sistema de pórticos no próprio local de construção. Este sistema consiste em dois carris paralelos que suportam um pórtico. Na parte superior do pórtico estão localizadas as extrusoras que depositarão o material de acordo com as especificações do projeto. Possui a capacidade de fabricar em escala, consoante as necessidades de produção, visto poder deslizar sobre os carris e produzir um novo edifício, quer seja igual ou diferente do anterior, através duma simples alteração dos ficheiros CAD/CAM. Também podem ser utilizados diferentes tipos de materiais com diferentes propriedades químicas, visto que o equipamento efetua a mistura dos mesmos momentos antes de serem depositados, e diferentes tipos de aditivos, tais como areia, gravilha, fibras, entre outros. A qualidade final dos objetos resultantes é de alta qualidade, necessitando apenas de pintura após o processo de repouso. No entanto, o CC pode ser modificado de forma a ser instalado um sistema de pintura autónomo, controlado por computador. Para além disso, o sistema também tem a capacidade de criar estruturas reforçadas com metal no seu interior, através de um sistema autónomo que coloca o esqueleto metálico do local de construção antes de começarem a ser produzidos os contornos da estrutura, em cimento. Adicionalmente, este sistema dispõe de vários tipos de sistemas autónomos que o permitem realizar, de forma autónoma, a colocação de canalização, circuitos elétricos e de comunicação e os próprios azulejos nas divisões (30).

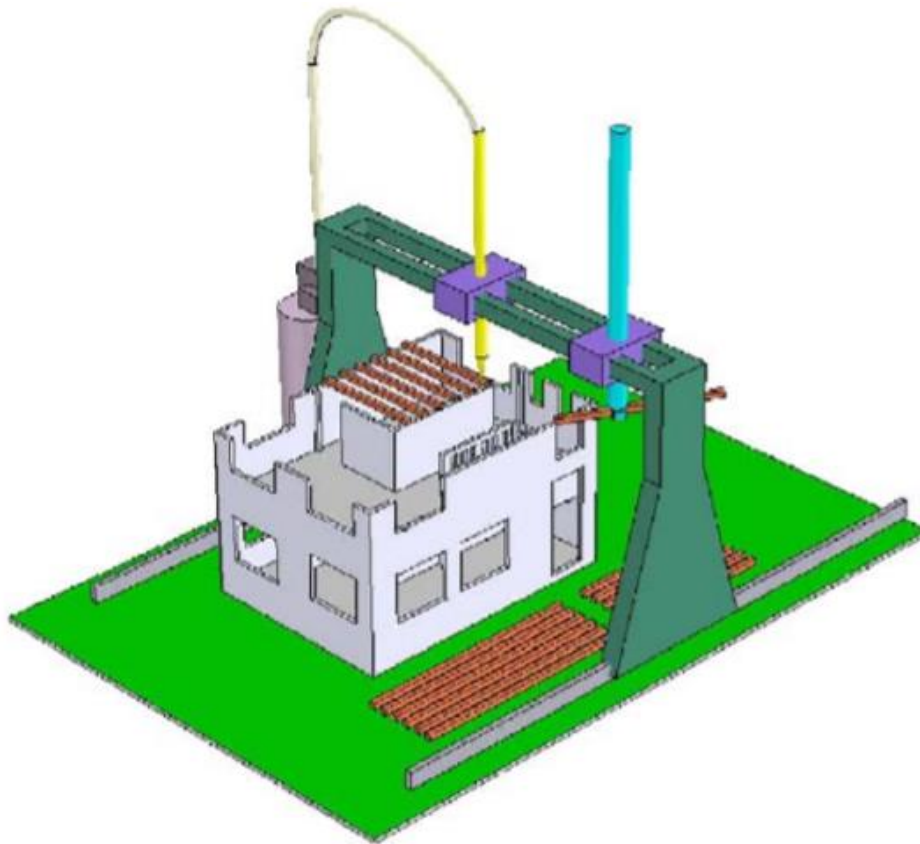


Figura 15 - Esquema do processo CC

Por outro lado, existe um processo diferente, conhecido como **D-Shape** e que constitui uma alternativa ao CC, sendo que é uma adaptação da tecnologia SLA. Neste, o material a ser utilizado encontra-se no estado sólido, em forma de granulado. Tal como no processo anterior, uma extrusora localiza-se na parte superior de um pórtico, que se encontra sobre um conjunto de carris. Esta ejeta um agente ligante que atua sobre o granulado, solidificando-o. É depositada uma nova camada de granulado e o processo repete-se, até o processo estar concluído. Este processo é particularmente eficaz na produção de peças de menor dimensão e com geometria extremamente complexa, fora do local de produção. As peças podem ser, posteriormente, montadas no sítio desejado. No entanto, também é possível fabricar estruturas no próprio local de construção utilizando apenas materiais encontrados no próprio no local de construção (28,29).



Figura 16 - Estrutura criada através do processo D-Shape

No entanto, o que torna este processo ainda mais complexo é o material utilizado, cimento. A especificidade deste material faz surgir novos desafios quanto à sua utilização, devido ao seu comportamento nos diferentes estados de matéria. No seu estado viscoso, ou “líquido”, podem surgir problemas relativos à extrusão (entupimento ou solidificação de material no interior do equipamento devido a erros na pressão utilizada para movimentar o mesmo), ao tempo de produção de cada camada e à sua deformação sob o seu próprio peso. No estado sólido, podem ocorrer problemas relacionados com a adesão entre as camadas de material depositado, com o encolhimento derivado do processo de solidificação ou com a ocorrência de falhas no

preenchimento das camadas. Tal como refere Buswell et al. (2018), os principais parâmetros a ter em conta no futuro desenvolvimento de técnicas de manufatura aditiva em cimento são a maneabilidade do material utilizado, a sua deformação após ser depositado, as propriedades estruturais do objeto solidificado, a conformidade com a geometria desejada e a liberdade do design criativo (31).

Estas tecnologias são extremamente promissoras e estão a ser alvo de cada vez mais exposição. Um pouco por todo o mundo se vão fabricando novos edifícios e estruturas através de técnicas de manufatura aditiva, tais como casas, edifícios de escritórios e de apartamentos e estruturas para parques recreativos, exemplos retirados de construções na China, Emirados Árabes Unidos, Estados Unidos da América, entre outros. Estes edifícios chegam a ter até 1100m² e os equipamentos que os produziram eram enormes, sendo que o maior consistia numa máquina de 150m x 10m x 6.6m (28).

Lunar Printing

Diretamente relacionado com a manufatura aditiva com cimento, a “impressão lunar” pode ser caracterizada como uma aplicação da mesma tecnologia em outros planetas e astros no sistema solar. Esta ideia tem vindo a ganhar relevância à medida que técnicas de manufatura aditiva vão sendo aperfeiçoadas e a utilização de tecnologias autónomas como forma de melhorar a condição humana têm vindo a ser debatidas pela comunidade científica. Certas ideias, tais como utilizar a Lua como uma plataforma de energia solar (que seria transportada, através de micro-ondas, de volta para a terra) ou a colonização da Lua e Marte, têm ganho proeminência na comunidade científica. A NASA (National Aeronautics and Space Administration) e a NSF (National Science Foundation) patrocinaram uma conferência onde o tema discutido foi a energia solar espacial (30). Para além disso, em dezembro de 2016 foi promovido o conceito da Aldeia Lunar, o próximo passo da exploração espacial, pelo Diretor Geral da Agência Espacial Europeia Johann-Dietrich Wörner. O âmbito do projeto passaria pela investigação científica em vários campos de conhecimento e assegurar a sobrevivência da espécie humana em ambientes designados como não-terrestres (32).

A construção de estruturas que protejam o ser humano de condições ambientais severas, que caracterizam tanto a Lua como Marte, é um dos fatores essenciais à sua sobrevivência. Como tal, surgem duas alternativas, o transporte de materiais de construção da Terra para a Lua/Marte, ou a utilização de materiais que se encontram nos próprios locais de construção. Sendo que a primeira é uma alternativa extremamente ineficaz, devido ao elevado tempo e custo de transporte, a segunda apresenta-se como a solução para este problema e é o ponto de partida para a utilização de técnicas de manufatura aditiva para o desenvolvimento da Aldeia Lunar (32).

Tanto o Contour Crafting como o D-Shape, ou variações destes métodos, poderiam ser utilizados como ferramentas construção na Lua e desenvolver estruturas apropriadas para a colonização humana. Estes equipamentos utilizam apenas recursos encontrados no local de construção, neste caso, regolito lunar, o nome dado ao material que se encontra na sua superfície. Como tal, a exploração espacial será facilitada por estas técnicas de manufatura aditiva, que contribuirão para o desenvolvimento de colónias espaciais capazes de sustentar vida humana (30).



Figura 17 - Conceitualização artística da futura Aldeia Lunar (Fonte: ESA)

Após ser realizada mais investigação sobre as características do regolito lunar, percebeu-se que este pode ser sinterizado utilizando micro-ondas, o que torna possível a fabricação de tijolos. Alternativamente, o regolito pode ser misturado com pequenas quantidades de material polimérico, o que dá origem a um material viscoso que mantém a sua forma após ser depositado. Posteriormente, pode ser feita a sinterização do material para o solidificar. Estas descobertas são fundamentais para o desenvolvimento desta tecnologia, visto que o ambiente noutros astros (Lua e Marte) são diferentes relativamente ao ambiente terrestre. Como tal, é necessário entender uma variedade de fatores, tais como a dinâmica de fluidos e temperatura do material extrudido sob diferentes níveis de gravidade, o processo de cura do material quando exposto a estes ambientes ou as características estruturais e mecânicas dos objetos finais (30).

Desta forma, os melhores resultados foram obtidos através de métodos direcionamento de energia (através da utilização de lasers ou redirecionamento da própria luz solar) e certos problemas causados pela extrusão de material são automaticamente postos de parte quando se

opta por este método. A produção apenas depende do direcionamento de energia e da reposição de material, sem existir a necessidade de o curar, posteriormente (32,33).

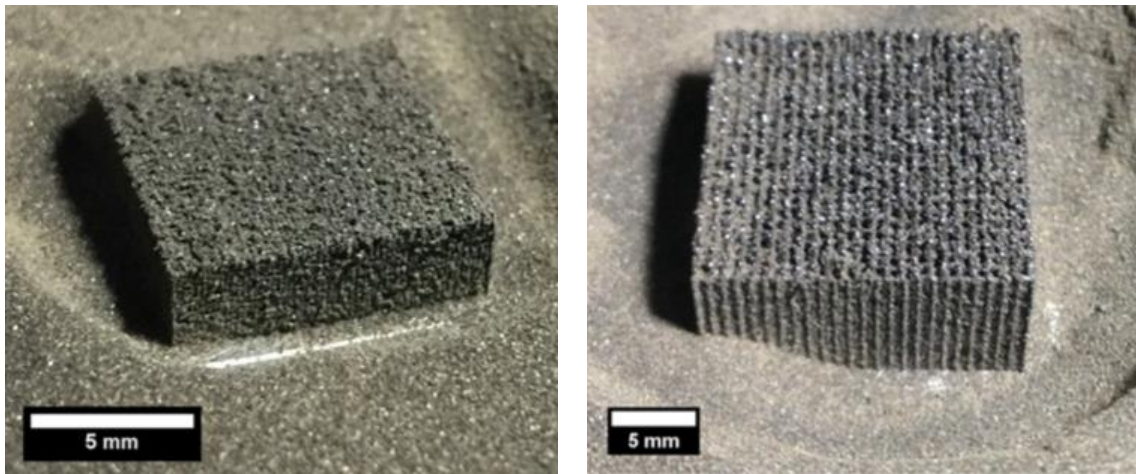


Figura 18 - Exemplos de regolito lunar produzido através de sinterização a laser

No entanto, a produção de estruturas através deste tipo de técnicas requer uma análise extremamente completa, de modo a cobrir todos os aspetos que possam originar problemas. A utilização de regolito lunar não é tão simples como aparenta, pois a sua composição química varia consoante o sítio de onde foi recolhida a amostra. Isto compromete a fiabilidade do material utilizado e pode originar problemas não esperados. Como tal, existem uma série de simuladores de solo lunar que foram desenvolvidos de forma a ser possível testar as características estruturais dos objetos resultantes utilizando diferentes tipos de composições químicas (32).

Posto isto, o simulador que aparenta ser o mais adequado, tendo em conta futura localização da Aldeia Lunar, é conhecido como JSC-1A e deve ser utilizado para testes futuros. Também deve ser testada a manufatura em ambientes de baixa gravidade (vácuo parcial), de forma a simular a atmosfera lunar e perceber como se comporta o material. Por outro lado, os equipamentos estarão expostos a radiação solar constante, o que pode levar a eventuais avarias ou falhas durante a sua utilização, e a pontuais quedas de micrometeoritos, o que pode danificar seriamente os equipamentos e as próprias estruturas e pôr em causa o desenvolvimento do projeto. Estes dois últimos problemas vão para além da própria atividade de manufatura, o que demonstra a complexidade da matéria em questão. No entanto, não deixam de constituir sérios constrangimentos que devem ser alvo de investigação, de forma a que a colonização dos astros se torne uma realidade (32).

Bioprinting

A impressão biológica tridimensional, ou **3D Bioprinting**, pode ser descrita como uma adaptação de várias tecnologias convencionais de manufatura aditiva, como a estereolitografia (SLA), métodos extrusivos (FDM) ou com lasers, com o propósito de fabricar estruturas biológicas tridimensionais. Estas estruturas (órgãos ou pedaços de tecidos celulares) podem, então, ser utilizadas em procedimentos médicos, tais como transplantes, reparação ou substituição de órgãos. A impressão deste tipo de “objetos” é possível através da utilização de materiais biológicos e celulares que, em conjunto, trabalham para promover o crescimento e adaptação dos tecidos biológicos (34).

Este processo tem sido desenvolvido de forma contínua durante os últimos anos e foram surgindo cada vez mais variações de processos de impressão semelhantes, que se adequam a diferentes tipos de objetivos. Contudo, estes podem ser agrupados em quatro conjuntos distintos, designados como processos extrusivos, de impressão a jato de tinta, estereolitografia e assistidos por lasers. As suas características variam entre a velocidade de impressão, a capacidade de imprimir verticalmente (devido à viscosidade inerente do material utilizado), a viabilidade das células (indicador da quantidade de células, em percentagem, que, literalmente, sobrevivem ao processo de produção, visto serem células biológicas), a densidade celular, a resolução/precisão da produção, a viscosidade do material suportado e, por fim, o custo de produção (34).

Contudo, o aspeto mais importante relativamente a este método é o material utilizado e as suas propriedades, a chamada “bioink”, ou biotinta, uma mistura de materiais biológicos e celulares (tais como colágeno, alginato, agarose, cartilagem, entre outros) e materiais bio poliméricos (tais como carboximetil quitosano, ácido hialurónico, entre outros). A biotinta, devido às suas características peculiares, apresenta-se como um material muito diferente de qualquer outro e a sua produção é uma das etapas mais complexas deste processo, visto que qualquer alteração na concentração dos materiais, por mais pequena que seja, em termos percentuais, pode alterar o comportamento e viabilidade das estruturas produzidas (rejeição de órgãos ou tecidos celulares devido a concentrações incorretas de material ou perdas de eficiência durante a produção, pela diminuição da viabilidade celular). Desta forma, a biotinta tem de ser criada tendo em conta as características finais desejadas dos objetos e o próprio método de produção escolhido (34).

Como se pode verificar, existe uma grande complexidade em torno deste processo, no entanto, os resultados obtidos ajudam a verificar que será cada vez mais relevante à medida que for sendo desenvolvido e os custos da sua utilização sejam reduzidos. Através de investigações realizadas *in vitro* e *in vivo*, já se desenvolveram biotintas capazes de simular e promover a regeneração e a formação óssea (35), e outras capazes de replicar a pele humana, com duas camadas. Como tal, a inovação na produção e desenvolvimento de biotintas é um fator essencial ao crescimento desta tecnologia (34).

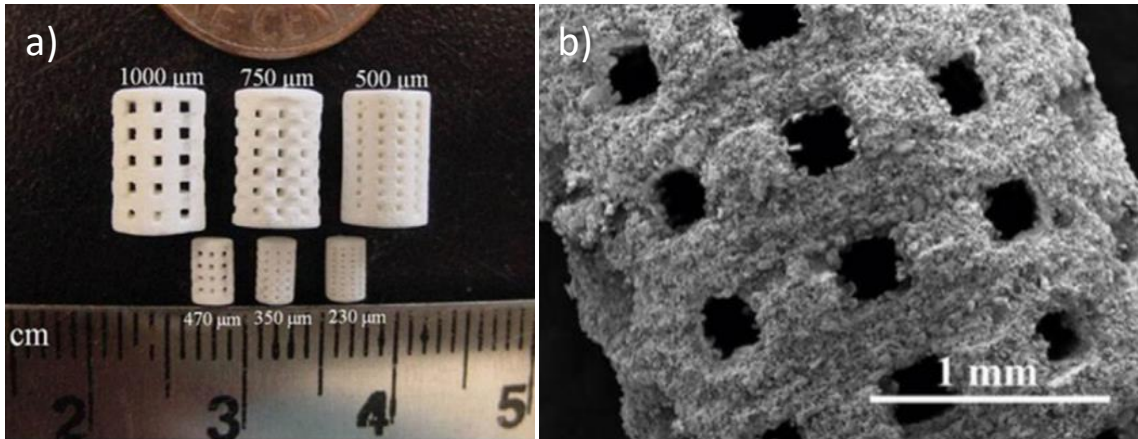


Figura 19 - a) Estrutura óssea produzida a partir de fosfato tricálcico; b) Imagem da superfície ampliada com um microscópio MEV.

Esta inovação fez surgir uma nova classe de material, as chamadas biotintas de alto desempenho. Estas apresentam diferentes características, tais como condutividade elétrica (através da mistura de nanotubos de ouro na biotinta), elasticidade e algumas possuem a capacidade de agir como sensores tácteis. O seu desenvolvimento tem em consideração problemas afetos a órgãos mais complexos, como o coração, nervos ou rins, nos quais as necessidades são diferentes de órgãos como, por exemplo, os ossos ou cartilagem. Contudo, a investigação, neste campo, também recai sobre os próprios métodos de produção. O desenvolvimento de novas técnicas de produção, que promovam maior versatilidade e maior precisão durante o processo produtivo, é um requisito essencial para a produção de bioestruturas complexas e funcionais. Um dos casos mencionados por Derakhshanfar et al. (2018) refere-se a uma técnica inovadora que possibilita a criação de bioestruturas que têm a capacidade de absorver água, a nível local, alterando a sua forma inicial e comportando-se como uma esponja (34).

Contudo, ainda existe algum caminho a ser percorrido antes de todos os constrangimentos associados à produção estarem solucionados. As técnicas existentes são afetadas por dois conjuntos de obstáculos, nomeadamente a produção das biotintas e das bioestruturas e a sua posterior implantação e adaptação ao ambiente no qual foram inseridas. Relativamente à produção, processos que utilizam extrusoras são afetados por entupimento se não for utilizada uma biotinta com a viscosidade adequada, particularmente em processos de longa duração. As próprias bioestruturas têm de apresentar níveis corretos de rigidez e elasticidade, de modo a permitirem o desenvolvimento de células, sem perderem propriedades estruturais. Quanto à sua implementação in vivo, a vascularização é o maior obstáculo. A bioestrutura implementada tem de ser “aceite” pelo organismo, o qual vai providenciar os ingredientes necessários à adaptação das células, tais como oxigénio e outro tipo de nutrientes (34).

5. Generative AI Design

O **Generative AI Design** é uma nova tecnologia que tem como objetivo inovar a forma como o design de produtos e objetos é feito, através da utilização de algoritmos e tecnologia Autodesk. Desde o início dos tempos que a atividade do design foi sempre realizada pelo ser humano. Depois da ideia inicial ser imaginada e concebida, é necessário possuir conhecimento sobre várias áreas do conhecimento, tais como física, química ou ergonomia, entre outras, para a criação de algo novo. Para além disso, o processo de criação e desenvolvimento requer inúmeras horas de trabalho de análise e prototipagem, até se chegar ao produto final. Com a utilização desta nova tecnologia, tanto os designers como os engenheiros podem auxiliar-se de ferramentas computacionais, algoritmos e inteligência artificial com o intuito de reduzir os custos e o tempo do processo criativo (36,37).

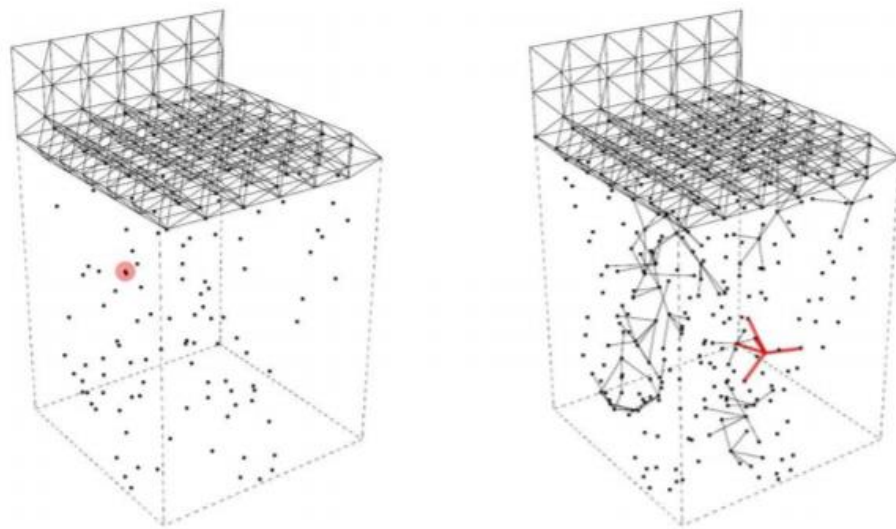


Figura 20 - Estrutura de uma cadeira a ser projetada através de algoritmos generativos

Este processo explora todas as hipóteses possíveis, através de algoritmos e cloud computing, para um determinado problema, conseguindo alcançar soluções que vão para além do design tradicional, através da simulação com base na própria evolução da natureza e formas biológicas. Para isto, é necessário que sejam inseridos no sistema certos requisitos e constrangimentos que definem o objeto pretendido, tais como o peso, custo, resistência, volume, densidade, entre outros. Isto permitirá ao sistema explorar todas as soluções possíveis que cumprem os requisitos indicados e, após inúmeras iterações generativas, apresentar a que melhor se adequa ao problema. A solução é analisada por intervenientes humanos e, caso seja necessário efetuar ajustes ou alterações, basta redefinir os parâmetros, e o processo repete-se. Após o design final estar concluído, é necessário utilizar um método de produção adequado para produzir formas orgânicas complexas, nomeadamente, a manufatura aditiva (36,37).

A utilização deste processo como forma de design para a manufatura aditiva tem uma série de vantagens, muitas das quais relacionadas, duma forma ou doutra, com a melhor utilização e gestão de recursos. Os objetos produzidos com o auxílio desta tecnologia usufruem de redução de peso, enquanto o seu desempenho é mantido, ou até melhorado. O tempo de desenvolvimento de produtos é extremamente reduzido, visto que são exploradas milhares de soluções possíveis, em simultâneo (36).

Ao mesmo tempo, demonstra ser extremamente útil quando utilizado na abordagem a problemas complexos ou demasiado específicos. Por outro lado, pode ajudar o ser humano estimular a sua criatividade, ao visualizar outro tipo de ideias e formas que nunca antes foram concebidas e, com isto, ajudar a desenvolver novos paradigmas na produção (36).

Um dos exemplos com maior relevância é o da Airbus, que se encontra a trabalhar com esta tecnologia atualmente. A empresa foi capaz de desenvolver generativamente uma partição, uma peça que separa o compartimento dos passageiros do compartimento da copa, que é 45% mais leve do que a sua antecessora, inspirada em ossos de mamíferos. A peça é feita a partir de uma liga metálica de alta resistência e foi produzida utilizando processos de manufatura aditiva. Como resultado, as novas partições requerem cerca de 20 vezes menos matéria-prima para serem produzidas. Desde a sua implementação nos novos modelos a partir de 2018 que é estimada uma poupança de 3.180kg de combustível por partição por ano. Todos estes fatores contribuem para a redução de custos e eficiência dos aviões e para uma melhor gestão de recursos (36,37).

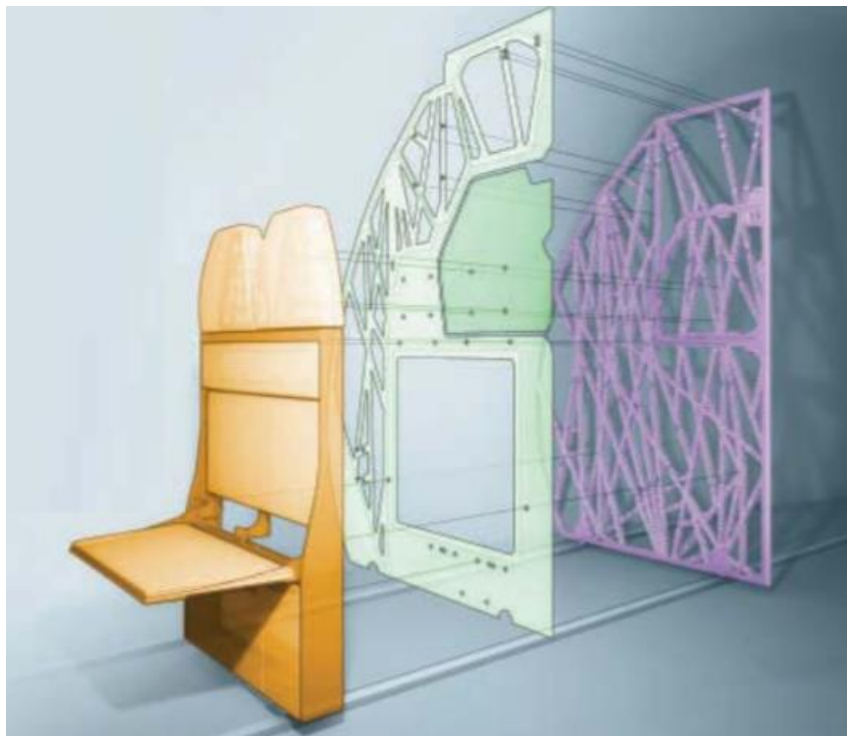


Figura 21 - Partição gerada através de algoritmos generativos

Outro exemplo de tecnologia deste tipo a ser utilizada hoje em dia é o projeto MX3D, que procura construir uma ponte utilizando técnicas de manufatura aditiva relacionadas com a construção de estruturas metálicas. A ideia é a ponte ser completamente construída com o mínimo de interação humana possível, sendo esta apenas necessária na parte dos inputs dos requisitos, análise e modificação de soluções e testes ao objeto final. Para tal, a empresa, em 2014, desenvolveu uma “impressora” robótica com vários eixos, que tem a capacidade de produzir o objeto no local onde o mesmo seria colocado e que pode utilizar metais e resinas. Ao mesmo tempo, o design da ponte foi concebido por Generative AI Design, para melhor explorar o potencial da tecnologia (37,38).



Figura 22 - Protótipo funcional da ponte MX3D em exposição na Dutch Design Week 2018 (Fonte: Dutch Design Week)

Como já se percebeu, o potencial de inovação em relação ao design e eficiência de recursos, a nível conceptual, é o ponto forte desta tecnologia. Contudo, a Autodesk está envolvida num projeto que pretende direcionar esta tecnologia a protótipos funcionais, como forma de desenvolvimento de melhores soluções baseadas na própria utilização dos produtos. Como tal, foi projetado e desenvolvido um protótipo de chassis de um carro. O mesmo foi equipado com uma grande variedade de sensores, para registar todo o tipo dados possíveis sobre o comportamento do veículo. De seguida, foi submetido a uma série de testes no deserto da Califórnia. Toda a informação recolhida foi, então, analisada pela plataforma Dreamcatcher, que gerou o design de uma estrutura completamente inovadora, inspirada em formas orgânicas. O conceito final apresentava um peso de cerca de 128kg, uma redução de aproximadamente 27% quando comparado ao conceito inicial, com um peso de 176kg, o que contribui para uma maior eficiência. Foi produzido utilizando o processo FDM, em policarbonato, com 1/3 da escala real, para posterior análise e avaliação de constrangimentos, tendo em conta a produção em escala real (37,39).

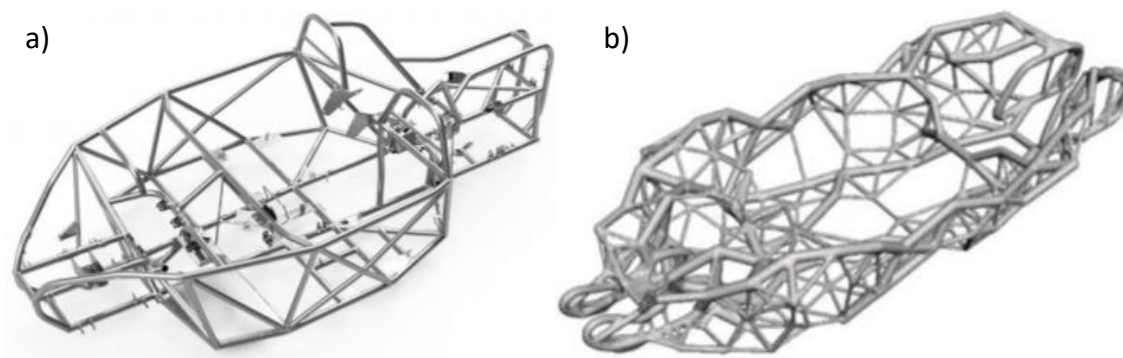


Figura 23 - a) Design inicial do chassis; b) Design final do chassis gerado através de algoritmos generativos.



Figura 24 - Protótipo digital do resultado final representado com recurso a realidade virtual

Conclusão

A manufatura aditiva é uma tecnologia disruptiva inovadora que tem a capacidade de revolucionar inúmeros setores de atividade. No seu início, na década de 1980, os objetos produzidos apenas tinham utilidade como protótipos representativos. Com o passar do tempo, assistiu-se a um enorme crescimento e desenvolvimento de vários tipos de processos e materiais, que abriram caminho a novas possibilidades de fabricação. A manufatura aditiva é vista como sendo o novo paradigma de produção de objetos e está na vanguarda do desenvolvimento tecnológico, sendo que, atualmente, é possível fabricar protótipos funcionais, bem como peças ou objetos prontos a utilizar.

A utilização de tecnologias de manufatura aditiva na indústria da produção permite a criação de objetos com peso reduzido, o que significa que é utilizado menos material na sua produção. Permite, também, a criação de estruturas com uma complexidade muito elevada, algo que vem aumentar a nossa capacidade de criação e exploração de novas formas e novos tipos de objetos. Estes tipos de melhorias contribuem para uma melhor gestão da matéria prima utilizada, bem como melhor eficiência e melhor desempenho dos objetos produzidos.

Apresenta-se como sendo muito versátil, sendo que a enorme variedade de processos que existem permitem que sejam utilizados muitos tipos de materiais diferentes, tais como polímeros (policarbonato, acrilonitrila butadieno estireno, polifenilsulfona, entre outros), cerâmicas, metais (ferro inoxidável, titânio, alumínio, vanádio, níquel, ouro, prata, cobre, entre outros), compósitos poliméricos, metálicos e cerâmicos, carbono, grafeno, cimento, regolito lunar e biomateriais (bio polímeros, colágeno, alginato, agarose, cartilagem, entre outros). Como tal, é uma tecnologia que pode ser utilizada em qualquer setor de atividade, sem que a matéria prima seja o fator restritivo.

Como se pode verificar, a manufatura aditiva é uma das tecnologias importantes relativas à nova revolução industrial, a Indústria 4.0, apresentando um enorme potencial de inovação em inúmeros setores de atividade. No entanto, quando comparada a técnicas tradicionais de manufatura subtrativa, apresenta algumas desvantagens que são muito significativas, particularmente quando está em causa a produção em massa. Atualmente, algo que é alvo de investigação são as propriedades mecânicas e estruturais dos objetos produzidos, nomeadamente em processos de manufatura aditiva com metais, cimento, regolito lunar e biomateriais. Ao mesmo tempo, as técnicas de manufatura aditiva existentes são muito lentas, devido à própria metodologia de fabricação. A velocidade de produção está diretamente dependente das características do material utilizado e tem de ser adequada em conformidade para os produtos terem a maior qualidade possível, o que se traduz numa baixa velocidade de produção. Estes fatores, quando aperfeiçoados, contribuirão para uma adoção mais generalizada desta tecnologia. O desenvolvimento de processos como o CLIP, no qual a

velocidade de produção permite a fabricação de produtos em cerca de 10 a 15 minutos, são um exemplo de como a inovação pode ultrapassar certos obstáculos com que se depara.

Ao mesmo tempo, o grande número de processos existentes é um fator que comprova a utilidade e potencial da manufatura aditiva. Fruto do avanço científico e do seu próprio desenvolvimento ao longo do tempo, novos tipos de materiais e novos tipos de processos começaram a surgir. Este fator contribuiu para uma consciência crescente de que a manufatura aditiva é, realmente, uma mais valia para toda a indústria, se for desenvolvida até ao ponto de poder substituir os métodos de produção tradicionais. Hoje em dia é, maioritariamente, utilizada na produção de peças altamente customizadas, com geometrias complexas e com requisitos muito específicos.

A manufatura aditiva pode ser considerada como uma oportunidade de melhoria da nossa capacidade produtiva e, conseqüentemente, da nossa qualidade de vida. O seu desenvolvimento irá permitir a manipulação de materiais como nunca antes foi possível, proporcionando a capacidade de responder a novos tipos de problemas. Estamos perante uma nova revolução industrial, que contribuirá para o desenvolvimento sustentável e eficiente da sociedade e em que a manufatura aditiva será a principal forma de produção.

Referências Bibliográficas

1. Mohamed M. Challenges and Benefits of Industry 4.0: An overview. :10.
2. Pereira AC, Romero F. A review of the meanings and the implications of the Industry 4.0 concept. *Procedia Manufacturing*. 2017;13:1206-14.
3. Dilberoglu UM, Gharehpapagh B, Yaman U, Dolen M. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*. 2017;11:545-54.
4. Drath R, Horch A. Industrie 4.0 - Hit or Hype? :6.
5. Xu M, David JM, Kim SH. The Fourth Industrial Revolution: Opportunities and Challenges. *International Journal of Financial Research*. 2018 Feb 5;9(2):90.
6. Xu LD, Xu EL, Li L. Industry 4.0: state of the art and future trends. *International Journal of Production Research*. 2018 Apr 18;56(8):2941-62.
7. Vaidya S, Ambad P, Bhosle S. Industry 4.0 - A Glimpse. *Procedia Manufacturing*. 2018;20:233-8.
8. Reischauer G. Industry 4.0 as policy-driven discourse to institutionalize innovation systems in manufacturing. *Technological Forecasting and Social Change*. 2018 Jul;132:26-33.
9. Wilenius M, Casti J. Seizing the X-events. The sixth K-wave and the shocks that may upend it. *Technological Forecasting and Social Change*. 2015 May;94:335-49.
10. Korotayev A, Zinkina J, Bogevolnov J. Kondratieff waves in global invention activity (1900-2008). *Technological Forecasting and Social Change*. 2011 Sep;78(7):1280-4.
11. Horváth B. THE RECOGNITION OF RESOURCE USE THROUGH INDUSTRIAL DEVELOPMENT FROM A SOCIAL PERSPECTIVE. 2018;5(1):12.
12. Grinin LE, Grinin AL, Korotayev A. Forthcoming Kondratieff wave, Cybernetic Revolution, and global ageing. *Technological Forecasting and Social Change*. 2017 Feb;115:52-68.
13. Qin J, Liu Y, Grosvenor R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond. *Procedia CIRP*. 2016;52:173-8.
14. Lasi H, Fettke P, Kemper H-G, Feld T, Hoffmann M. Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*. 2014 Aug;6(4):239-42.
15. Lu Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*. 2017 Jun;6:1-10.
16. Zhong RY, Xu X, Klotz E, Newman ST. Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*. 2017 Oct;3(5):616-30.
17. Monostori L. Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges. *Procedia CIRP*. 2014;17:9-13.
18. Almada-Lobo F. The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*. 2016 Jan 24;3(4):16.

19. Wong KV, Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*. 2012;2012:1-10.
20. Guo N, Leu MC. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2013 Sep;8(3):215-43.
21. Johnson AR, Caudill CL, Tumbleston JR, Bloomquist CJ, Moga KA, Ermoshkin A, et al. Single-Step Fabrication of Computationally Designed Microneedles by Continuous Liquid Interface Production. Yamamoto M, editor. *PLoS ONE*. 2016 Sep 8;11(9):e0162518.
22. He H, Yang Y, Pan Y. Machine learning for continuous liquid interface production: Printing speed modelling. *Journal of Manufacturing Systems*. 2019 Jan;50:236-46.
23. Januszewicz R, Tumbleston JR, Quintanilla AL, Mecham SJ, DeSimone JM. Layerless fabrication with continuous liquid interface production. *Proc Natl Acad Sci USA*. 2016 Oct 18;113(42):11703-8.
24. Han Y, Dong J. High-Resolution Electrohydrodynamic (EHD) Direct Printing of Molten Metal. *Procedia Manufacturing*. 2017;10:845-50.
25. Cui Z, Han Y, Huang Q, Dong J, Zhu Y. Electrohydrodynamic printing of silver nanowires for flexible and stretchable electronics. *Nanoscale*. 2018;10(15):6806-11.
26. Chang J, He J, Mao M, Zhou W, Lei Q, Li X, et al. Advanced Material Strategies for Next-Generation Additive Manufacturing. *Materials*. 2018 Jan 22;11(1):166.
27. Parhizkar M, Sofokleous P, Stride E, Edirisinghe M. Novel preparation of controlled porosity particle/fibre loaded scaffolds using a hybrid micro-fluidic and electrohydrodynamic technique. *Biofabrication*. 2014 Nov 27;6(4):045010.
28. Bos F, Wolfs R, Ahmed Z, Salet T. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2016 Jul 2;11(3):209-25.
29. Gosselin C, Duballet R, Roux Ph, Gaudillière N, Dirrenberger J, Morel Ph. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*. 2016 Jun;100:102-9.
30. Khoshnevis B. Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction*. 2004 Jan;13(1):5-19.
31. Buswell RA, Leal de Silva WR, Jones SZ, Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018 Oct;112:37-49.
32. Labeaga-Martínez N, Sanjurjo-Rivo M, Díaz-Álvarez J, Martínez-Frías J. Additive manufacturing for a Moon village. *Procedia Manufacturing*. 2017;13:794-801.
33. Goulas A, Binner JGP, Harris RA, Friel RJ. Assessing extraterrestrial regolith material simulants for in-situ resource utilisation based 3D printing. *Applied Materials Today*. 2017 Mar;6:54-61.
34. Derakhshanfar S, Mbeleck R, Xu K, Zhang X, Zhong W, Xing M. 3D bioprinting for biomedical devices and tissue engineering: A review of recent trends and advances. *Bioactive Materials*. 2018 Jun;3(2):144-56.
35. Bose S, Vahabzadeh S, Bandyopadhyay A. Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials Today*. 2013 Dec;16(12):496-504.

36. McKnight M. Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. KEG. 2017 Feb 9;2(2):176.
37. Noor AK. Artificially intelligent systems are learning how to develop new products and designs. What does that leave engineers to do? DIGITAL DESIGN. :6.
38. Sobotka A, Pacewicz K. Mechanisation and automation technologies development in work at construction sites. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng. 2017 Oct;251:012046.
39. Nourbakhsh M, Morris N, Bergin M, Iorio F, Grandi D. Embedded Sensors and Feedback Loops for Iterative Improvement in Design Synthesis for Additive Manufacturing. In: Volume 1A: 36th Computers and Information in Engineering Conference [Internet]. Charlotte, North Carolina, USA: ASME; 2016 [cited 2019 Aug 27]. p. V01AT02A031. Available from: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/DETC2016-59627>