

BENCHMARK MAIS Tec #1 Tecnologias de produção

**Estudo Técnico Científico
Tecnologia, Inovação e Tendências**

MAIS Tec - Consórcio para a Transferência de Conhecimento Científico e Tecnológico



NORTE2020
PROGRAMA REGIONAL DE INTERVENÇÃO

PORTUGAL
2020

UNIÃO EUROPEIA
Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional



**universidade
de aveiro**

**Tec
inho**



BENCHMARK MAIS Tec #1

Tecnologias de Produção

Estudo Técnico Científico

Tecnologia, Inovação e Tendências

Proprietário:

Consórcio MAIS Tec - Consórcio para a Transferência de Conhecimento Científico e Tecnológico

Desenvolvido por:

SCIENCENTRIS

Publicado online em:

www.maistec.pt

1

Nº de páginas: 71

Maio de 2019



Índice

Sobre o Projeto MAIS Tec.....	4
SCIENCENTRIS	5
1 Introdução	7
2 Estado da Arte.....	16
2.1 Mercado.....	16
2.2 Equipamentos/Tecnologias.....	22
2.2.1 Manufatura Aditiva	23
2.3 Materiais a Utilizar	41
2.4 Aplicações.....	45
2.4.1 Medicina e <i>Bioprinting</i>	45
2.4.2 Arte e Moda	46
2.4.3 Construção Civil.....	46
2.4.4 Automóvel e Aeroespacial.....	47
2.4.5 Agricultura.....	48
3 Tendências e Oportunidades	50
4 Casos de Estudo.....	54
4.1 Sapatilhas Futurecraft 4D – Adidas – Equipamentos desportivos	54
4.2 Sondas para Medição do Fluxo de Ar – Vectoflow – Aviação.....	56
4.3 Plataformas Esterotáxicas para Neurocirurgias – FHC - Medicina	59
5 Oportunidades da Tecnologia para o Projeto – Análise SWOT.....	62
6 Conclusões.....	65
7 Bibliografia.....	68

Índice de Tabelas

TABELA 1: TABELA COMPARATIVA ENTRE O PLA E O ABS[43].....	38
TABELA 2: COMPARAÇÃO DE TEMPERATURAS DE IMPRESSÃO DE VÁRIOS MATERIAIS[53][36].....	43
TABELA 3: PROPRIEDADES MECÂNICAS E TÉRMICAS DO EPU FABRICADO PELA CARBON[72]	55
TABELA 4: ESPECIFICAÇÕES DA SONDA DE KIEL PRODUZIDA PELA VECTOFLOW[75].....	57
TABELA 5: PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PA 2201[74]	60
TABELA 6: ANÁLISE SWOT SOBRE O POSICIONAMENTO DA TECNOLOGIA PARA O PROJETO	63

Índice de Figuras

FIGURA 1: ESQUEMA QUE REPRESENTA OS PRODUTOS E SERVIÇOS QUE CONTEMPLAM A IOT[4].	10
FIGURA 2: NÍVEIS DE ORGANIZAÇÃO DO BIG DATA E OS BENEFÍCIOS AQUANDO A SUA IMPLEMENTAÇÃO[4].	11
FIGURA 3: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ARQUITETURA ORGANIZACIONAL DA COMPUTAÇÃO EM NUVEM[6].	12
FIGURA 4: CASO DE EXEMPLO DA APLICAÇÃO DE REALIDADE VIRTUAL NA INDÚSTRIA[7].	13
FIGURA 5: EXEMPLO DE UMA OBJETO A SER GERADO ATRAVÉS DE IMPRESSÃO 3D[8].	14
FIGURA 6: O MODELO CIRCULAR QUE REPRESENTA O FUNCIONAMENTO DA CIBERSEGURANÇA[11].	16
FIGURA 7: PREVISÕES MUNDIAIS DA INDÚSTRIA DE IMPRESSÃO 3D PARA VENDA DE PRODUTOS E SERVIÇOS AM (EXPRESSOS EM MILHARES DE MILHÕES DE \$ RESPETIVAMENTE)[24].	25
FIGURA 8: O CICLO DE HYPE DE GARTNER, A EVOLUÇÃO DE MANUFATURA ADITIVA DE 2013 A 2015[27].	27
FIGURA 9: DIFERENTES PROCESSOS DE MANUFATURA ADITIVA[23].	28
FIGURA 10: EFEITO DE REFINAMENTO DA MALHA DE TRIÂNGULOS NA FORMA FINAL DA PEÇA[26].	28
FIGURA 11: ETAPAS PARA A PRODUÇÃO DE UMA PEÇA EM MANUFATURA ADITIVA[28].	29
FIGURA 12: IMPACTO DO VOLUME DAS SÉRIES NOS CUSTOS DE PRODUÇÃO (EXPRESSO EM NÚMERO DE UNIDADES OU VOLUME DE PRODUÇÃO) (ESQUERDA) E IMPACTO DE PERSONALIZAÇÃO NOS CUSTOS DE PRODUÇÃO (DIREITA)[24].	31
FIGURA 13: (A) PROCESSO ESTEREOLITOGRAFICO DE CONSTRUÇÃO DESCENDENTE; (B) PROCESSO O ESTEREOLITOGRAFICO DE CONSTRUÇÃO ASCENDENTE[31].	32
FIGURA 14: ESQUEMA GENÉRICO DO FUNCIONAMENTO DA ESTEREOLITOGRAFIA[33].	33
FIGURA 15: SUPERFÍCIE DE DUAS PEÇAS PRODUZIDAS PELOS PROCESSOS: (A) SLA® E SEMELHANTES, (B) CLIP®[35].	34
FIGURA 16: DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO DE PROTOTIPAGEM RÁPIDA POR SLS[37].	35
FIGURA 17: DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO FABRICO POR FILAMENTO FUNDIDO – FFF[40].	37
FIGURA 18: MATERIAIS UTILIZADOS NA FFF[43].	38
FIGURA 19: DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO 3DP[42].	40
FIGURA 20: DESENHO ESQUEMÁTICO DO PROCESSO ROBOCASTING[45].	41
FIGURA 21: ORELHA IMPRESSA ATRAVÉS DE IMPRESSORA 3D[56].	46
FIGURA 22: PONTE POR IMPRESSÃO 3D[59].	47
FIGURA 23: MATERIAL IMPRESSO POR MEIO DO PLA[63].	49
FIGURA 24: GRÁFICO DE TENSÃO VERSUS DEFORMAÇÃO DO EPU[72].	55
FIGURA 25: ADIDAS <i>FUTURECRAFT</i> 4D[73].	56
FIGURA 26: SONDA DE KIEL PRODUZIDA PELA VECTOFLOW[75].	57
FIGURA 27: TUBOS DE KIEL PRODUZIDOS PELA VECTOFLOW[75].	57
FIGURA 28: PLATAFORMA ESTEREOTÁXICA PRODUZIDA PELA FHC[76].	60
FIGURA 29: VISTAS DA PLATAFORMA ESTEREOTÁXICA PRODUZIDA PELA FHC[76].	61
FIGURA 30: MÁQUINA FORMIGA P 100 DA EOS[76].	61

Sobre o Projeto MAIS Tec

O presente Estudo Científico decorre no âmbito da implementação do projeto “MAIS Tec - Consórcio para a Transferência de Conhecimento Científico e Tecnológico”, que é uma iniciativa no quadro de uma ação coletiva e integrada, de reforço da transferência de conhecimento científico e tecnológico, promovida em copromoção pela SANJOTEC - Associação Científica e Tecnológica, intervindo na qualidade de promotor líder, o ISQ - Instituto de Soldadura e Qualidade, a Universidade de Aveiro, através da sua Escola Superior Aveiro Norte, e a TECMINHO - Associação Universidade-Empresa para o Desenvolvimento, que intervêm enquanto copromotores, e candidatado ao Aviso para Apresentação de Candidaturas NORTE-46-2016-08, correspondendo à operação registada com o código universal NORTE-02-0246-FEDER-000033, e cofinanciado através do NORTE 2020 - Programa Operacional Regional do Norte 2014-2020.

O consórcio “MAIS Tec” visa contribuir para a intensificação tecnológica da base produtiva regional, através da transferência de conhecimento científico e tecnológico para o reforço da valorização económica de ativos e recursos intensivos em conhecimento em I&D+i, em domínios de aposta e especialização estratégica regional, associados às tecnologias de produção; polímeros, compósitos e materiais avançados; moldes; materiais; energia; e habitat; em processos e tecnologias relativas à fabricação /manufatura digital (digital manufacturing), fabricação de forma livre (freeform fabrication), manufatura aditiva (additive manufacturing), modelagem por deposição (de matéria) fundida /fabricação por filamento fundido (fused filament fabrication), e desenvolvimento /design de produto.

A atividade MAISTec Benchmark consiste na realização de iniciativas de benchmark, envolvendo os diversos agentes económicos, em torno da Tecnologia, da Inovação e de tendências atuais.

De forma a manter e aumentar a competitividade da região, no âmbito desta ação pretende-se realizar uma iniciativa diferenciadora de vigilância tecnológica e das inovações, mantendo assim um processo contínuo de recolha e análise de informação presente em documentos de patentes nacionais e internacionais e outros documentos, que ajudam na tomada de decisão em todos os tipos de organizações, empresas e instituições, particularmente os grupos de

investigação. A informação que se pretende disponibilizar de uma forma organizada e processada sobre os setores técnicos de especialização da região, que pode fornecer dados relevantes sobre os últimos progressos, as patentes existentes, a perda dos direitos e outras informações relevantes, de natureza técnica, que possam ser cruciais para a tomada de decisões, e aumento da competitividade.

SCIENCENTRIS

A Universidade do Minho está atualmente entre as mais prestigiadas instituições de ensino superior do país, tendo também vindo a afirmar-se progressivamente no panorama internacional. Fundada em 1973, conta com dois grandes pólos, o campus de Gualtar, em Braga, e o campus de Azurém, em Guimarães. É neste último que se encontra a Escola de Engenharia, onde a ciência e a tecnologia são trabalhadas e postas ao serviço da sociedade contribuindo para a melhoria da qualidade de vida das populações. Esta é uma Escola aberta ao exterior (à sociedade e ao tecido económico-productivo) e empenhada em transformar o conhecimento que cria e que difunde numa alavanca do desenvolvimento sustentável. É nesta estrutura que a SCIENCENTRIS se insere. A SCIENCENTRIS é uma SpinOFF da Universidade do Minho que atua sob o lema "From Knowledge to Market" transformando o conhecimento gerado em ações de investigação e desenvolvimento, em produtos de elevado valor acrescentado, partindo do conhecimento gerado no âmbito da Plataforma FIBRENAMICS. Assim, neste âmbito, a SCIENCENTRIS é uma empresa de desenvolvimento de produtos inovadores com base em materiais avançados para diversos setores de serviço incluindo medicina, desporto, construção, transportes, arquitetura, proteção, entre outros. Atualmente, a SCIENCENTRIS, através da sua ligação ao grupo de investigação que lhe deu origem na Universidade do Minho, possui cerca de 25 investigadores, de diversas áreas científicas incluindo Eng^a de Polímeros, Eng^a Mecânica, Eng^a Civil, Eng^a Eletrónica, Eng^a Têxtil, Eng^a Biomédica, Eng^a Materiais, entre outras. Fruto desta dinâmica, possui cerca de 12 patentes, mais de 400 artigos publicados em conferências e revistas científicas e diversos produtos inovadores desenvolvidos conjuntamente com agentes industriais.

Capacidade tecnológica

O desenvolvimento de materiais fibrosos cada vez mais complexos tem permitido obter materiais compósitos com excelente desempenho, apresentando as características/propriedades mais adequadas às exigências das necessidades de diferentes áreas de aplicação, incluindo medicina, transportes, desporto, arquitetura e construção civil. Atendendo à sua complexidade, a caracterização destes materiais requer a utilização de conhecimentos e de meios físicos específicos, existentes atualmente na Universidade do Minho.

As competências tecnológicas e científicas no domínio dos Testes e Ensaaios deste tipo de materiais existentes na Universidade do Minho incluem:

- Caracterização mecânica, térmica, estrutural, reológica, ambiental, físico-química e ótica de matérias-primas e de peças em plásticos;
- Caracterização morfológica e microestrutura de materiais compósitos reforçados por fibras;
- Caracterização fúngica e bacteriológica de materiais poliméricos

1 Introdução

Primeiro foi a mecanização da produção, com o auxílio da máquina a vapor, depois a eletricidade e a produção em massa com as linhas de montagem de Henry Ford. Revoluções industriais impulsionadas por significativos avanços tecnológicos que levaram a mudanças significativas das estruturas socioeconómicas e culturais a nível mundial, e que se perpetuaram por séculos, a primeira, ou por sete décadas, a segunda[1].

Na década de 1970 surge uma nova era industrial, com o desenvolvimento de tecnologias como os computadores, a microeletrónica, a fibra ótica, e campos como as telecomunicações, nuclear, agricultura biológica e biogenética, permitiu que o Mundo avançasse de uma forma cada vez mais frenética. Em pouco mais de dez anos desde o início do século XXI, o Mundo assistiu a uma transformação digital em todas as áreas da economia e da sociedade nunca antes vista[2].

Numa época em que a indústria se posiciona a nível global como motor de crescimento económico, apresentando um papel fundamental na manutenção do emprego e na estabilidade social, o rápido desenvolvimento da tecnologia permite um reposicionamento do setor industrial sem precedentes[1].

À escala mundial a crise financeira e a recessão sentida nos últimos anos, obrigaram os líderes mundiais e a sociedade a olhar para a indústria de outra forma. O setor passou a ser valorizado pela real criação de valor, muito superior à que é possível pelo setor dos serviços e, os países que durante anos apostaram numa estratégia de deslocalização, procurando locais de produção de mão-de-obra barata, empenham-se atualmente na recuperação interna do tecido empresarial[3].

Assim sendo, à medida que os níveis de produção no Mundo cresceram, também o rendimento dos países mais desenvolvidos e o nível de exigência das populações subiu. Com um ritmo de vida cada vez mais acelerado, graças ao impacto das novas tecnologias, as empresas tiveram que alinhar o passo com as exigências dos consumidores num ambiente cada vez mais competitivo. A diferenciação, e com ela o nível de rentabilidade, faz-se pelo tempo que cada empresa leva desde o momento em que pensa um produto, requerido por um novo mercado com enorme capilaridade e em constante mutação, e o faz chegar ao mercado[2].

A recente tomada de consciência da importância da indústria, colide diretamente com décadas de desindustrialização em alguns países europeus, que colocam a Europa em risco de perder atividades de elevado valor acrescentado. Neste panorama, o bloco europeu está a empenhar-

se para garantir a liderança económica mundial, recorrendo a todos os meios ao seu dispor para renovar o tecido industrial[3].

Uma mudança que poderá ser simplificada e impulsionada pela 4ª Revolução Industrial. Nos últimos anos os avanços tecnológicos, que ligam o Mundo físico ao virtual, permitem o desenvolvimento de um conjunto de ferramentas que convertem não apenas a forma como vivemos, como permitem criar novos modelos de negócios e novas formas de produção, assegurando uma ligação mais eficaz e integrada aos consumidores, acelerando os ciclos de inovação, ao mesmo tempo que permitem aumentar a produtividade e reduzir o risco[4].

Tecnologias que permitem criar conceitos como a Internet das Coisas (IoT), computação em nuvem, que tornaram realidade as redes sociais, os telefones inteligentes e a gestão de grandes volumes de dados vêm acompanhadas por novos desafios, como a cibersegurança ou a análise preditiva de grandes volumes de dados, mas são essencialmente fontes de oportunidades para aumentar a produtividade e rentabilidade da indústria, garantindo a sustentabilidade do negócio num Mundo cada vez mais competitivo e global[4].

Um Mundo em que as fronteiras físicas foram abolidas e as virtuais são mais facilmente transportadas, fazendo com que a posição geográfica de um país como Portugal deixe de ser vista como um fator de perda de competitividade. À semelhança do que acontece um pouco por todo o mundo, o País dá os primeiros passos na 4ª Revolução Industrial. As empresas que não aderirem às transformações tecnológicas e ao mundo da inovação tenderão a desaparecer sem fazer história[1].

As tecnologias da Indústria 4.0 classificam-se em dois grandes grupos: i) aquelas que permitem fazer crescer o negócio, aumentando as receitas, fabricando produtos e serviços mais inteligentes, garantido uma ligação mais eficaz e integrada da relação com os clientes e acelerando os ciclos de inovação e design; ii) as tecnologias que permitem aumentar a produtividade reduzindo o risco, através do planeamento, prevendo as mudanças e reagindo em tempo real, criando uma ligação digital dentro da fábrica que ligue Tecnologias de Informação e Tecnologias Operacionais, automatizando e ampliando operações de pós-venda[3].

Para responder a grandes desafios, como o crescimento do negócio e a redução dos riscos de operação, as empresas precisam de adotar soluções e abraçar um conjunto de conceitos que permitam manter a competitividade. A transição para um mundo digital não é imediata, mas com as ferramentas certas de auxílio, é possível atingir os objetivos[3].

1) Internet das Coisas (IoT)

A internet começou por fornecer um ambiente que permitia às pessoas e organizações ligarem-se entre si. Atualmente falamos da Internet das coisas (IoT) que evoluiu para uma era totalmente tecnológica, onde os aparelhos possuem a capacidade de comunicar entre si, tornando o dia-a-dia cada vez mais fácil[4].

A Gartner estima que a IoT venha a gerar, ainda este ano, serviços na ordem dos 235 milhões de dólares, mais 22% do que em 2015. Em 2020 deverá representar um valor de negócios na ordem dos 1,9 biliões de dólares. E o crescimento não se deve apenas ao papel que desempenhará no dia-a-dia dos consumidores[4].

A IoT e sua evolução será fundamental para a indústria do futuro. Com a IoT o papel ativo das pessoas torna-se cada vez mais reduzido nos processos produtivos tradicionais, tendo tendência a desaparecer da equação. De acordo com os dados fornecidos pela interação entre objetos irão garantir que os processos industriais são conduzidos de forma mais controlada, e que se realizem análises detalhas e que as decisões sejam eficazes e dinâmicas. Em resultado da introdução da IoT espera-se que as fábricas inteligentes tornar-se-ão mais inteligentes[5].

Um estudo realizado pelo World Economic Forum, indica que os custos de manutenção podem ser reduzidos em quase 30% por via de procedimentos que predigam a necessidade de manutenção e as paragens não planeadas podem ser minimizadas em cerca de 70%[5].

De forma genérica existe uma multiplicidade de funções na industria que podem ser desempenhadas com o auxilio da IoT, com evidentes benefícios económicos para as empresas: i) Há soluções de transporte inteligentes que podem aumentar os fluxos de trânsito, reduzir o nível de consumo e definir quais os veículos que tem prioridade na hora de chegar à oficina; ii) as redes elétricas inteligentes são mais eficientes a ligar energias renováveis, a melhorar a fiabilidade do sistema ou a faturar aos clientes com base em pequenos aumentos de consumo; iii) sensores de monitorização podem diagnosticar, ou mesmo antever, necessidades de manutenção ou de substituição de componentes que estejam a chegar ao fim de vida ou até definir de forma eficaz os horários das equipas de manutenção; iv) sistemas de dados estão a ser incorporados nas infraestruturas das cidades inteligentes, tornando mais fácil a gestão de lixos, a aplicação da lei ou outro tipo de programas[5]. A figura 1, representa a expansão da conectividade

que atualmente vai muito para além dos smartphones e as comunicações de pessoa para pessoa, agora abrangem as redes de dispositivo para dispositivos nos mercados de máquina a máquina, industrial, casa inteligente, automotiva, entre outras.



Figura 1: Esquema que representa os produtos e serviços que contemplam a IoT[4].

2) Big Data

Ao passo que no início do século XXI a conectividade era exclusivo do mundo digital, na Indústria 4.0 o digital e o Mundo Real estão fortemente interligados[3].

Com os dados a serem muitas vezes referidos como “a matéria-prima do século XXI” e o mundo real a um passo de se transformar num imenso sistema de informação, dois dos conceitos mais importantes da nova era industrial são o Big Data e a “análise”[5].

À medida que estes dados são armazenados em sistemas seguros, analisados e transformados em informação relevante, as empresas adquirem novos e potentes instrumentos de negócio. Os sistemas de informação já se encontram no centro da produção industrial, mas com a 4ª Revolução Industrial estes sistemas estarão cada vez mais ligados a um leque alargado de subsistemas, processos, objetos internos e externos, a redes de fornecedores e clientes. Sistemas que podem ser controlados em tempo real,

com maior flexibilidade e substituição da maquinaria. Isto permitirá uma produção cada vez mais eficiente, com processos de produção que podem ser alterados num curto espaço de tempo. Ao nível dos serviços de manutenção de processos e maquinaria, estes estarão cada vez mais facilitados[4].

Está assim criado o chamado *Consumer to Business*. Assim sendo, a informação recolhida pela utilização de produtos e serviços inteligentes permitirá a cada fabricante perceber cada vez melhor os seus consumidores. Os dados recolhidos junto dos consumidores podem ser utilizados para definir preços e vender produtos ou serviços de forma mais inteligente[1].

Aliado à utilização de Big data e da análise dos mesmo surge um grande desafio: a necessidade de uma infraestrutura que permite realizar estes processos independentemente da dimensão do negócio[4]. Na figura 2, é possível observar os três grandes níveis desta tecnologia e os benefícios que lhe estão associados.

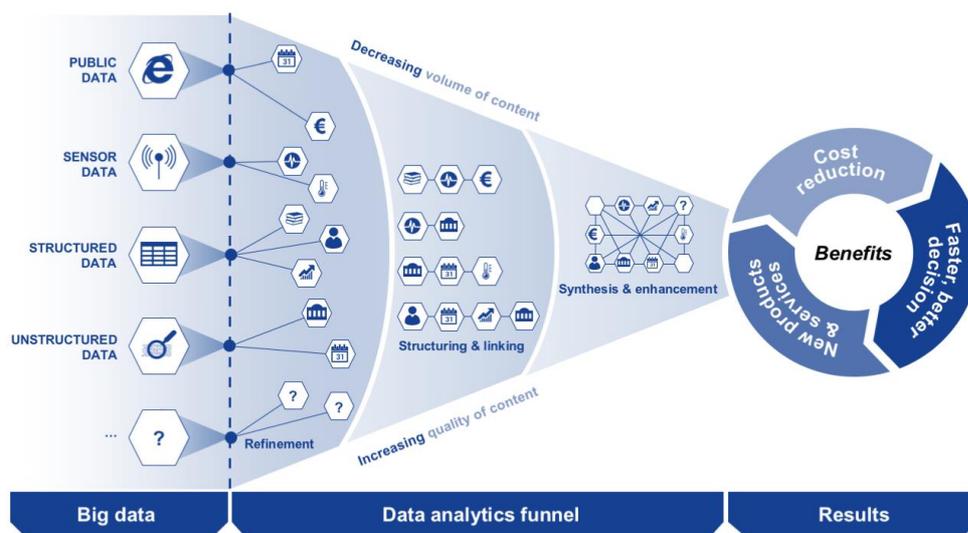


Figura 2: Níveis de organização do Big data e os benefícios aquando a sua implementação[4].

3) Computação em nuvem

À medida que a utilização da internet foi crescendo e que aumentou o volume de dados, foi-se tornando cada vez mais difícil para os sistemas de *hardware* e *software* existentes suportar e gerir esta carga[6].

O avanço tecnológico da informação foi acompanhado pelo desenvolvimento de novas arquiteturas informáticas e soluções como sejam a virtualização e o software enquanto serviço[6].

Através da computação em nuvem, os utilizadores podem aceder a qualquer aplicação necessária ao desenvolvimento de negócio sempre que for preciso através da internet, utilizando os servidores instalados num fornecedor de serviço em lugar de manter centros de dados dentro da organizações. Contudo, consegue-se, assim, uma gestão de dados mais flexível e ágil. A computação em rede divide-se em três modelos: IaaS (infraestruturas enquanto serviço) que abrange o hardware e a gestão da infraestrutura de TI; PaaS (Plataforma enquanto serviço) que fornece as ferramentas para a realização de desenvolvimentos; SaaS que permite o acesso aos programas e aplicações instalados num servidor. Desta forma, a arquitetura de computação em nuvem é organizada através de blocos funcionais, nomeadamente recursos de computação ou ambientais de implementação, que são organizados em patamares específicos, como ilustrado na Figura 3[6].

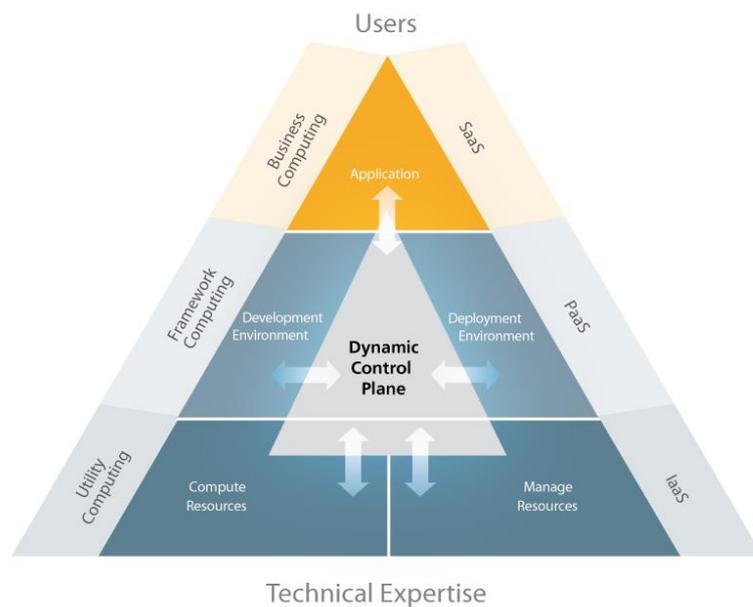


Figura 3: Representação esquemática da arquitetura organizacional da computação em nuvem[6].

4) Realidade Virtual

A simulação de objetos passa a ser cada vez mais comum com a indústria 4.0. A realidade virtual deixa de ser exclusiva dos jogos de vídeo para ser dirigida a outras áreas, desde

as aplicações militares, setor da saúde, educação, turismo, arquitetura, vendas marketing e indústria. Os ambientes virtuais podem ser utilizados em cada momento do processo industrial, seja para planear, projetar, fabricar, prestar serviços e manutenção, testar produtos ou realizar o controlo da qualidade[7].

Com a indústria 4.0 deixa de ser necessário uma empresa estar instalada para perceber se conseguirá operar de uma forma eficiente e como serão os produtos que vai colocar no mercado. Cada processo poderá ser simulado e verificado virtualmente e só quando a versão final estiver pronta se dará o início à produção física, transferindo todo o software, parâmetro e matrizes numéricas para as máquinas que controlam a produção[7].

O setor automóvel é um dos que mais beneficia da tecnologia de realidade virtual, que é utilizada não apenas ao nível da produção, mas também ao nível das vendas. É caso de exemplo, aplicações opcionais como sejam a cor do veículo ou a escolha de acessórios podem ser testados através da realidade virtual. E um potencial cliente pode mesmo ter uma experiência de condução através de um simulador antes de comprar o automóvel[7].

Por outro lado, o uso da realidade virtual pode permitir obter reações por parte dos consumidores em fases muito iniciais do desenvolvimento, o que possibilita ajustar e acertar os objetos de modo a garantir uma maior satisfação das necessidades dos clientes, Figura 4[7].

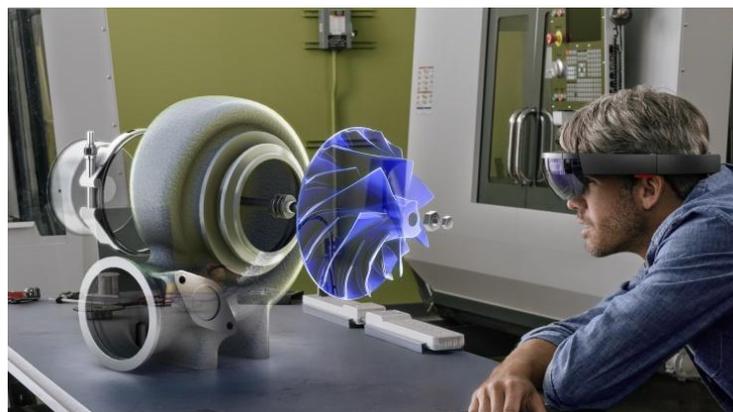


Figura 4: Caso de exemplo da aplicação de realidade virtual na indústria[7].

5) Impressão 3D

As inovações de produtos e serviços não surgem sem fundamento. O seu aparecimento e desenvolvimento exige um longo trabalho de pesquisa e desenvolvimento que se

apresenta cada vez mais fácil com a utilização das tecnologias da Indústria 4.0, como seja a simulação via realidade virtual, mas há um processo com base na linha tentativa-erro, que pode ter custos muito elevados. Além ser um impedimento à competitividade por via do tempo que demora à empresa a colocar um novo produto no mercado[8].

A produção de protótipos através da tecnologia de impressão 3D pode aumentar a velocidade não apenas do processo de *design*, mas também da produção final, permitindo a redução das dependências na cadeia de valor. É caso de exemplo, a indústria automóvel, uma vez que os protótipos podem ser produzidos em algumas horas contra as quatro a seis semanas que eram necessárias com as técnicas tradicionais. Esta redução dos tempo de projeção e produção serão particularmente relevantes num mundo em que os modelos de negócio serão cada vez mais determinados por maiores exigência de customização e personalização[8].

Por outro lado, a Produção Aditiva permite reduzir o capital necessário para atingir economias de escala, fazendo baixar os custos de entrada numa nova localização. Assim sendo, aumento a flexibilidade, reduz o capital necessário para atingir dimensão, e amplia a variedade de produtos que podem ser produzidos com uma unidade de capital, reduzindo os custos associados a mudanças de produção e à customização[9].

É de notar, as tecnologias como a impressão 3D permitem custos cada vez mais competitivos em quantidades de produção cada vez mais pequenas, daí que esta tecnologia possa ser crucial no momento de decidir entrar num mercado onde os custos de produção são muito altos ou muito baixos[9].



Figura 5: Exemplo de uma objeto a ser gerado através de impressão 3D[8].

6) Cibersegurança

Internet das Coisas, ambientes virtuais, acessos remotos, dados armazenados na nuvem são inúmeras as oportunidades disponibilizadas pela 4ª Revolução Industrial. No

entanto existem desvantagens e ameaças associadas, nomeadamente, a transmissão dos Zettabytes de dados, e informações sensíveis, gerados anualmente, representa uma nova vulnerabilidade, abrindo a porta a que a informação possa estar comprometida, o que eleva os riscos tanto para pessoas como para organizações. Através da IoT, os riscos de segurança irão muito para além de um ou outro momento mais embaraçoso por via da divulgação de elementos pessoais, podendo chegar à violação de importantes sistemas públicos. Segundo estudo desenvolvido pela Deloitte e publicado no Fórum Económico Mundial “Violar os dados de localização de um automóvel é uma simples invasão de propriedade, mas violar o sistema de controlo desse mesmo carro é uma ameaça para a vida”. Ou seja, além de criar novas formas de obtenção de valor, a 4ª Revolução Industrial também cria a necessidade de proteger o valor desta informação altamente preciosa[10].

A informação e a segurança dos dados são fatores críticos de sucesso para a indústria. Garantir comunicações seguras em cada ponto do processo de produção e interações seguras entre diferentes instalações são elementos básicos na otimização da indústria. As ferramentas proporcionadas pela Indústria 4.0 permitem não só criar o ambiente de segurança cibernética, mas também beneficiar da cibersegurança[11].

Uma das ameaças de segurança mais comuns, nesta nova era, está relacionada com os problemas que podem surgir quando se ligam dispositivos mais antigos e equipamentos mais modernos. E no contexto da Indústria 4.0 é importante que os dados só sejam disponibilizados a pessoas autorizadas e que as fontes de informação e a sua integridade sejam verificadas, Figura 6[11].



Figura 6: O modelo circular que representa o funcionamento da Cibersegurança[11]

2 Estado da Arte

Neste capítulo pretende-se efetuar a aquisição de conhecimento e competências sobre as áreas de aplicação das tecnologias abordar no âmbito do presente relatório, procurando identificar áreas e nichos de mercado, necessidades, especificações requeridas e perspetivas de evolução. Assim, pretende-se identificar claramente quais as áreas e nichos de mercado e que, de uma forma global, os conceitos e produtos desenvolvidos a partir de introdução destas tecnologias de produção na indústria poderão apresentar mais vantagens competitivas para as empresas.

2.1 Mercado

Neste subcapítulo é objetivo conhecer e caraterizar os principais impactos que a introdução de novas tecnologias na indústria provocam, bem como, necessidades e perspetivas de evolução. Por outro lado, pretende-se verificar as áreas mais desenvolvidas, e de uma forma global, de que modo a alocação de recursos humanos é afetada, e qual os impactos que terão na economia e no aumento de competitividade das indústrias portuguesas.

A indústria é responsável por 16% do PIB mundial, por 70% de todo o comércio internacional e mais de dois terços de investigação e desenvolvimento realizados por privados[12].

O VAB (Valor Acrescentado Bruto) atribuído à indústria aumentou 2,7% ao ano nos países industrializados e 7,4% nas economias emergentes e em desenvolvimento entre 2000 e 2007.

A nível mundial o VAB da indústria está a crescer a cerca de 3% ao ano[12].

Na Europa, a Indústria é responsável por 15% do VAB (comparado com 12% nos Estados Unidos). É um fator determinante na Investigação & Desenvolvimento, inovação, produtividade, criação de emprego e exportações. A indústria gera 80% da inovação de origem europeia e 75% das exportações[12].

O setor industrial português atingiu o seu auge em 1996, altura em que o seu peso na economia foi maior, com 19,5% do VAB total, mas foi perdendo relevância até 2009. Depois de uma ligeira recuperação em 2010, a indústria voltou a seguir uma tendência descendente (situando-se nos 13,7% em 2015). O emprego mostra igualmente uma tendência de quebra. Entre 2000 e 2014, a indústria transformadora perdeu 355 mil postos de trabalho (-32,4%). Em Portugal, o índice de produtividade (VAB) por empregados nas empresas industriais é de 48, valor que compara com um índice de 96 na República Checa, de 79 em Espanha e de 96 na Áustria. Para a PwC a diferença reside, em grande parte, na utilização de métodos de trabalho pouco estruturados[12].

Em 2012, a Comissão Europeia definiu como objetivo que a quota da Indústria no crescimento económico de 16% para 20% em 2020. A atual política industrial europeia não será suficiente para suportar esta meta. A reindustrialização europeia é impensável sem digitalização, principalmente porque sem essa transformação países como a Alemanha, a Áustria e a Polónia não vão conseguir aumentar muito mais a sua contribuição, antecipa a Roland Berger. Assim sendo, e de forma a cumprir essa meta é preciso que países como a Inglaterra e a França, cuja Indústria pesa em torno de 10% do PIB (Produto Interno Bruto), restabeleçam as suas indústrias em grande escala em menos de sete anos. Para chegar aos 20%, a Europa teria que criar 500 mil milhões de euros em VAB e seis milhões de empregos (partindo do princípio que o crescimento do PIB e a inflação se mantinham)[10].

Atualmente, o nível de investimento industrial na Europa é cerca de 30 mil milhões de euros abaixo do nível de depreciação, o que significa que os ativos estão a perder valor. Se incluirmos o valor acrescentado dos serviços que podem ser gerados pela Indústria 4.0, este objetivo pode ser alcançado em 2030, mas apenas se as empresas europeias mantiverem um nível de investimento na ordem dos 90 milhões de euros por ano[10].

A Indústria 4.0 foi considerada uma medida estratégica do governo alemão, de forma a consolidar a sua liderança tecnológica através da prática comum de investigação e de desenvolvimento nas empresas e de forma a limitar o afastamento entre os setores da indústria através de uma vasta rede de contactos. Após a Alemanha ter avançado com a implementação

de um programa estratégico explicitamente vocacionado para facilitar e/ou promover a Quarta Revolução Industrial (Indústria 4.0) e implementar avanços tecnológicos esquecidos ou desaproveitados, outros países seguiram o exemplo, como o caso dos Estados Unidos, China, Japão e União Europeia e Portugal[13].

Em Portugal foi implementada a iniciativa “Portugal i4.0” da Estratégia Nacional para Digitalização na Economia que tem como objetivo orientar um plano de medidas iniciais de valorização, promoção e investimento na digitalização da economia portuguesa e no tecido empresarial português. Atualmente, estão mais de 100 empresários e instituições em Portugal envolvidas nesta iniciativa[13].

O aparecimento de todas as iniciativas à volta da Indústria 4.0 vieram da necessidade de inovar, complementar ou melhorar processos produtivos estagnados ou ultrapassados, alguns dos quais introduzidos ou revistos nas anteriores revoluções industriais. Efetivamente, o conceito da Indústria 4.0 tem tido um grande impacto nos países e empresas e tem levado ao investimento de recursos bastante significativos por parte das mesmas em, principalmente, tecnologias digitais (sensores e dispositivos de conectividade), *software* e aplicações (como Manufacturing Execution Systems (MES)), formação dos colaboradores e mudanças culturais e organizacionais[3].

As empresas sentem necessidade de estar em constante evolução e, por essa razão, verifica-se que uma das grandes motivações das empresas para a implementação das tecnologias de nova geração que sustentam a Indústria 4.0 é a obtenção de vantagens competitivas em relação às concorrentes, obtendo lucros superiores às restantes empresas, criando e distribuindo valor económico. Contudo, a materialização das soluções i4.0 em lucros superiores depende dos recursos e capacidades distintivas da empresa que adota essas soluções e apenas é sustentável quando, apesar dos esforços dos concorrentes para a alterar, a vantagem permanece[1].

Com a implementação de soluções i4.0, na economia global, serão essencialmente esperados impactos no Produto Interno Bruto (PIB), crescimento, consumo, emprego, investimento, comércio e inflação, contudo é no crescimento e no emprego que assentam as maiores preocupações[14].

Ao nível da primeira variável, o crescimento, provoca opiniões distintas nos economista. Alguns defendem que as contribuições mais críticas da revolução industrial já foram realizadas e que o impacto na produtividade está praticamente terminado e, no sentido contrário, alguns

acreditam que a tecnologia e inovação provocaram e irão continuar a provocar aumentos na produtividade e o crescimento económico[14].

Segundo o Boletim Económico do Banco de Portugal, 2017, espera-se um aumento da produtividade até 2020 em conjunto com uma melhoria no mercado de trabalho. E, tanto a nível de Portugal, como a nível mundial, as expectativas são que a atividade económica continue a crescer, embora a um ritmo progressivamente menor[15].

O impacto das tecnologias digitais no emprego tem sido uma preocupação não de hoje, mas desde os primeiros desenvolvimentos nas fábricas, tendo sido ao longo dos anos sujeito a várias análises. Assim sendo, a introdução de automação nas fábricas, nomeadamente com a introdução de robots, e a digitalização de processos origina uma substituição nos diferentes tipos de fatores produtivos. O avanço tecnológico origina processos de reestruturação necessários gerando-se, por exemplo, um problema sobre o que acontecerá aos trabalhadores, que poderão defrontar-se com problemas de desemprego ou que poderão mesmo ser obrigados a requalificar-se com estas novas medidas[15].

Aquando das principais inovações como a máquina a vapor, a eletricidade e a linha de montagem nas revoluções industriais houve sempre perdas de emprego e queda de alguns setores, mas, rapidamente, surgiram outras oportunidades em setores outrora desconhecidos ou inexplorados, aparecendo áreas mais produtivas e rentáveis. O que aconteceu com os avanços tecnológicos referidos anteriormente, continuará a acontecer em todas as disrupções nos negócios provocados por novos métodos ou inovações tecnológicas: mudança de perspetivas de quais os trabalhos necessários, quem os deve realizar, onde e como serão executados[16].

Segundo estudos e análises desenvolvidas, os avanços na inteligência artificial e na robótica irão permitir substituir trabalhos mais rotineiros e também complementar o ser humano ao amplificar as competências de resolução de problemas, adaptabilidade e criatividade. Desta forma, leva a um aumento de produção que pode resultar numa maior procura e ajustes da oferta de mão-de-obra, tornando os trabalhadores mais produtivos até, eventualmente, estimular a procura pelos seus serviços. Podem assim gerar-se situações de rendimentos marginais crescentes, que podem conduzir a uma maior procura de mão-de-obra, não obstante uma maior automação do processo produtivo. De notar que os processos de digitalização e automação estão a gerar uma polarização do emprego, ou seja, existe uma maior procura por trabalhadores mais qualificados que conseguem capturar valor da tecnologia e por trabalhos

menos qualificados que estão encarregues de tarefas básicas que não podem ser substituídas por tecnologia, já os trabalhadores afetos a atividades menos exigentes, mais rotineiras e mais suscetíveis a automação, passam a ser menos procurados em resultado da evolução tecnológica[16].

De forma a interpretar os fenómenos de polarização, é necessário entender este rápido crescimento de posto de trabalho e salários nas ocupações na área dos serviços pois a polarização é impulsionada pela interação entre duas forças: as preferências dos consumidores (que optam pela variedade em vez de especialização) e o progresso tecnológico não neutro (que diminui o custo de realizar tarefas rotineiras mas tem um impacto comparativamente menor no custo de realizar tarefas manuais) ocorrendo uma deslocação dos trabalhadores de tarefas rotineiras para tarefas manuais, nomeadamente, em áreas de serviços[17].

Neste fenómeno, é possível obter facilmente uma divisão entre o tipo de tarefas realizadas pelos trabalhadores numa dada empresa. Esta classificação passa por distinguir habilidades de tarefas, sendo que esta última se subdivide em tarefas rotineiras (havendo distinção entre tarefas rotineiras cognitivas e rotineiras manuais), manuais e abstratas (que podem ser analíticas e cargos de gestão)[17].

É de destacar as tarefas rotineiras como as tarefas mais suscetíveis a serem substituídas por processos digitais ou tarefas suficientemente definidas para que qualquer pessoas as consiga realizar com distinção. Podem-se subdividir por tarefas rotineiras cognitivas, como contabilidade ou trabalho com dados, e rotineiras manuais, como processos repetitivos e de monitorização numa linha de montagem. Contudo, para um país como Portugal, com lenta acumulação de capital, nomeadamente, de capital tecnológico e com poucos trabalhadores altamente qualificados, autores defendem que esta divisão ainda é atual e faz todo o sentido, uma vez que tanto as tarefas rotineiras cognitivas como as tarefas rotineiras manuais têm grande importância em setores de serviços e indústria[18].

As tarefas não-rotineiras são subdivididas em abstratas e manuais. As tarefas abstratas exigem algo mais que as rotineiras, nomeadamente, capacidade de resolução de problemas, intuição e criatividade. Uma máquina dificilmente consegue replicar processos abstratos e, normalmente, as pessoas que trabalham nestas tarefas possuem um maior nível de escolaridade, capacidade analítica e apenas utilizam os meios digitais como complemento ao seu trabalho. As tarefas abstratas chegaram a subdividir-se em analíticas e cargos de gestão, mas são geralmente consideradas na mesma categoria. Já as tarefas manuais exigem a adaptação dos trabalhadores

a cada situação, reconhecimento visão e interação pessoal. Tratam-se de tarefas simples e muitas vezes inatas ao Homem, mas demasiado complexas para serem replicadas por uma máquina[19].

Contudo, aquando da avaliação dos efeitos da digitalização da indústria no mercado de trabalho não se deve ter em conta apenas o que se perde com os avanços tecnológicos, mas pensar no mecanismo económico central numa perspetiva mais geral, onde se tem em conta a forma como a automação pode também afetar positivamente o mercado de trabalho, acrescentando valor às novas tarefas realizadas. Além disso, o trabalho humano pode também complementar as novas tecnologias em vez de ser substituído e, assim, os trabalhadores não especializados e com tarefas substituíveis não têm de ser necessariamente condenados pela automação ou digitalização se se investir em capital humano e em estratégias de longo prazo para a produção de competências complementares em vez de substitutas. Segundo estudos desenvolvidos, por cada trabalho formulado pela indústria de alta tecnologia, cerca de cinco empregos complementares podem e devem ser criados[19].

Assim, mesmo com custos de transação, pois alguns empregos acabam por desaparecer, o efeito geral é positivo[20].

No entanto, há quem não tenha as mesmas perspetivas e argumente que a tecnologia tem um impacto negativo ao nível do emprego e que muitas desigualdades nas economias avançadas advêm da pressão tecnológica que tem existido ao longo dos anos, como diminuição de salários e de investimentos em capital tradicional[21].

Em forma de conclusão, perante questões relacionadas com mercado de trabalho, são utilizados argumentos que defendem um decréscimo na quantidade de trabalhos disponíveis em resultado da introdução de novas tecnologias ou que o ritmo de substituição dos seres humanos por máquinas está a aumentar a taxa de desemprego e outros que avançam no sentido inverso. Borland e Coelli (2017) realizaram um estudo para a Austrália, Autor (2015) para os Estados Unidos, Gregory et al., (2016) para a Europa e chegaram a conclusões semelhantes: não existem evidências de que a adoção de tecnologias tenha diminuído a quantidade total de trabalho disponível e que exista um efeito acelerado da mudança tecnológica no mercado de trabalho[21].

2.2 Equipamentos/Tecnologias

Voltados para um época de profundas e rápidas mutações tecnológicas, o trilho do Digital está aí e a Indústria não pode fugir a este destino. Um claro exemplo desta evolução galopante é a Manufatura Aditiva.

A banalização da designação “impressão 3D” veio ajudar à disseminação das atuais tecnologias de manufatura aditiva, também designadas por tecnologias de fabrico rápido aditivo, fundamentados na construção de objetos camada sobre camada, a partir de um ficheiro gerado em computador. Longínqua vai a década de 80 quando as primeiras tecnologias de “prototipagem rápida” surgiram no mercado como ferramentas de ajuda ao processo de desenvolvimento de produto. Hoje, as tecnologias de manufatura aditiva disponíveis no mercado fabricam produtos.

No atual cenário industrial, geralmente, privilegiam-se elevadas produções e aplicam-se metodologias que maximizem a utilização dos fatores produtivos com os decorrentes benefícios económicos. Contudo, neste mundo globalizado a célula básica é o individuo e esta entidade, individualista, procura preferencialmente produtos únicos, distintivos e personalizados. Este é um grande desafio e uma oportunidade maior para quem oferece inovação no Produto.

22

Contudo, convém ter presente barreiras técnicas que é necessário vencer na manufatura aditiva, muito em especial, nas soluções de equipamentos hoje disponíveis no mercado. Refiram-se algumas: elevados custos de aquisição e de manutenção, baixa produtividade, necessidade de melhores resoluções e definições no produto, dimensões dos objetos a produzir, processo de garantia de qualidade, softwares que não maximizam o potencial das tecnologias e as dificuldades inerentes à baixa disponibilidade de pessoal técnico qualificado.

Portugal, e a região Norte em particular, tem uma componente muito relevante da sua produção industrial baseada em processos subtrativos, ou seja, processos que recorrem à remoção de material para fabrico de produtos, como é exemplo a maquinação, nomeadamente na transformação de metais e de ligas metálicas. A manufatura aditiva pode, neste caso em particular, levar a uma mudança, mesmo que parcial, de paradigma, através da diminuição da utilização de técnicas subtrativas em benefício do uso de técnicas aditivas. Este é um exemplo

onde é imperativo que a indústria esteja atenta e participe nesta revolução industrial disruptiva que está a acontecer. Hoje, há empresas nacionais, nomeadamente na área do fabrico de ferramentas e moldes, que começam a incorporar estas técnicas de fabrico rápido nos seus processos produtivos. Assume aqui especial relevância a sinterização seletiva por laser (SLS), uma técnica de manufatura aditiva que transforma pós (essencialmente, metálicos e poliméricos) em produtos de elevado interesse para a indústria. Uma breve palavra para outros setores industriais onde a manufatura aditiva vai penetrando e conquistando o seu espaço: o setor da cerâmica através de técnicas de robocasting e de impressão 3D, o setor do metal duro com robocasting e fabricação por deposição de filamento fundido (FFF), o setor da joalheria através de SLS e FFF, o setor do produto através do recurso ao FFF e à Estereolitografia. No setor da moda e vestuário, muito em particular nos acessórios, a manufatura aditiva tem um elevado potencial pois permite criar acessórios únicos e ao gosto do cliente, com materiais novos e inovadores. Por outro lado, a impressão de têxteis é ainda um tema que está a dar os primeiros passos – a falta de flexibilidade dos atuais materiais e o facto de não haver impressoras 3D dedicadas são problemas em estudo e em fase de solução. Tem havido algum desenvolvimento com polímeros, como seja latex, silicone, poliuretano e teflon, porventura combinados com algodão, viscose ou nylon, originado tecidos muito elásticos e com efeito de memória.

2.2.1 Manufatura Aditiva

Expressões como impressão a 3D, prototipagem rápida, manufatura digital direta, fabrico rápido e fabrico de formas sólidas livres são frequentemente utilizadas para descrever os processos da AM. A American Society for Testing and Materials, ASTM, define a Manufatura Aditiva (MA) como sendo um processo de junção de materiais, normalmente por deposição de várias camadas, com o propósito de produzir objetos a partir de fontes de dados gerados por sistemas de projeto auxiliado por computador (Computer Aided Design 3D)[22]. Existem várias vantagens associadas a esta tipologia de processo, tais como a capacidade de produzir moldes tridimensionais complexos e detalhados, algo praticamente impossível de obter através de processos subtrativos. A flexibilidade para produzir diferentes peças a partir do objeto 3D, sem a necessidade de recorrer a ferramentas típicas, tais como moldes, é igualmente uma das vantagens da Manufatura Aditiva, no que diz respeito à produção de pequenas séries. Por

outro lado, é incorreto pensar em utilizar as tecnologias de fabrico rápido com o propósito de substituir tecnologias com a injeção ou extrusão, uma vez que são tecnologias distintas com objetivos diferentes. Tecnologias de injeção têm como propósito produzir em grandes séries, enquanto que a manufatura aditiva deve tirar partido do fato de conseguir responder às necessidades específicas dos clientes de forma rápida e para produção de pequenas quantidades. Com o uso dos processos aditivos, produzir qualquer peça *in situ* tornou-se uma realidade, diminuindo os gastos relativos ao transporte. Este tipo de manufatura tem crescido de forma acelerada em áreas como a indústria automóvel, setores aeroespaciais e a indústria médica, onde já é utilizada para a criação de próteses personalizadas e implantes. Assim sendo, estudos desenvolvidos apontam que em 2032 será possível utilizar este tipo de processos para a produção de órgãos humanos. No entanto, a velocidade de construção lenta, a pouca diversidade de materiais disponíveis e as estruturas menos resistentes, quando comparadas com estruturas obtidas por outros processos, são algumas das barreiras que a manufatura aditiva precisa de suprimir[23].

O que se conhece atualmente como manufatura aditiva teve início na década de 1980, quando era mais conhecida como prototipagem rápida. Ao longo dos anos e dado a sua preponderância o nome foi redefinindo-se, e o termo manufatura aditiva, mais amplo, tem vindo, a ser utilizado englobando tanto a filosofia de fabrico como as diferentes tecnologias desenvolvidas. Esta redefinição surge alinhada com a evolução das peças impressas, visto que inicialmente eram apenas protótipos com a principal função de materializar novos conceitos/design. No entanto, com o aumento da precisão e das propriedades dos materiais utilizados, as peças impressas começam a fazer parte de montagens e a ser passível de ser utilizado. De facto, o entusiasmo gerado em torno da AM inclui muitos campos, desde a informática e design de produtos, novos materiais e incluindo Engenharia LEAN. Esta tendência está refletida em alguns indicadores, como a previsão do crescimento mundial da indústria de impressão a 3D, onde uma tendência de aumento exponencial de 2014 até 2020 poderá ser observada na Figura 7[24].

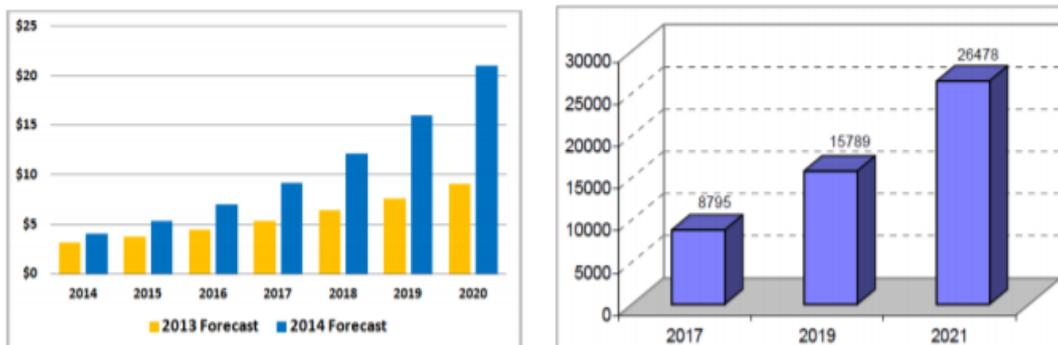


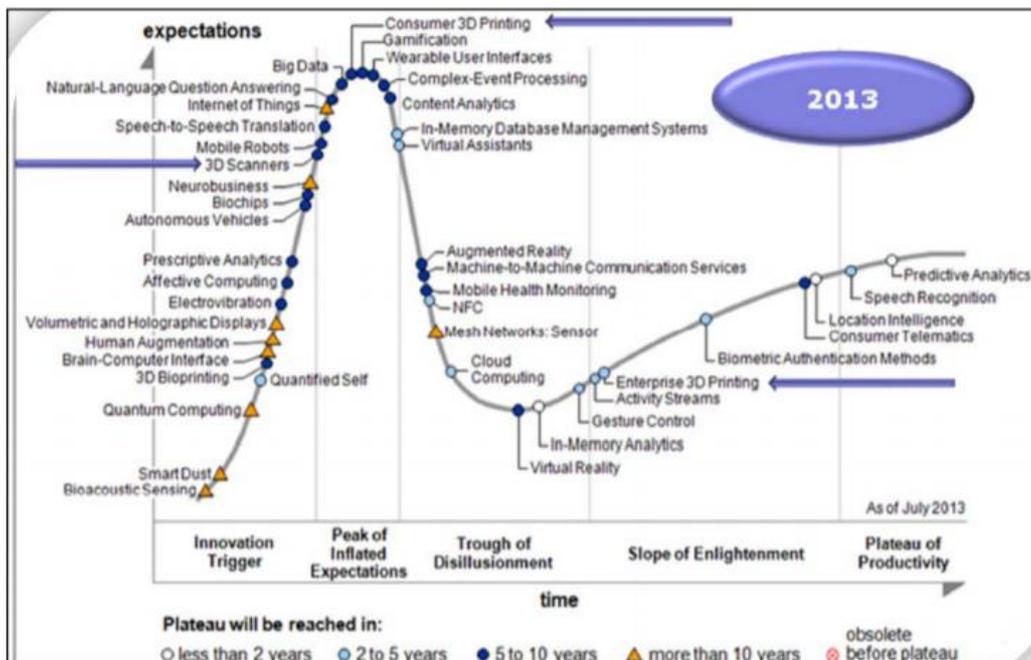
Figura 7: Previsões mundiais da indústria de impressão 3D para venda de produtos e serviços AM (expressos em milhares de milhões de \$ respetivamente)[24].

Com efeito, o número de países a explorar esta tecnologia tem crescido nos últimos anos. A adoção da AM está a evoluir rapidamente, sendo agora incluída nas competências base nacionais de diversos países. Nos Estados Unidos da América (EUA), o fabrico em 3D é um assunto de prioridade nacional, esperando-se fortes investimentos no campo da AM. De forma a sustentar esta prioridade, a administração dos EUA lançou o National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII), com o propósito de coordenar e financiar projetos de pesquisa em tecnologias de AM[25]. Por outro lado, os países Asiáticos também estão a desempenhar um papel importante no desenvolvimento da AM, ou seja, cerca de 30% do total dos sistemas industriais da AM estão instalados na região Ásia-Pacífico. Por outro lado na Europa, a utilização da AM com pós metálicos é um novo domínio industrial em crescimento. Observando os mais recentes projetos Europeus financiados pelo European Framework Programme, foi alcançado um nível elevado em projetos e iniciativas de investigação em AM, em particular nas aplicações direcionadas para os setores médico e aeroespacial. Para além disso, estão a ser de forma transversal compreendidos esforços significativos no desenvolvimento e uniformização da tecnologia e no aumento da capacidade de produção de peças com AM[26].

O Ciclo Hype de Gartner, é uma ferramenta de análise gráfica aplicada ao estudo da maturidade e/ou do nível de adoção e aplicação social de determinadas tecnologias, considera que as tecnologias da AM já têm mais de vinte anos de utilização no mercado da prototipagem rápida de peças plásticas para o design de produto. Contudo, a atenção do público só se centrou na AM nos últimos anos quando as oportunidades da instrumentação e da produção direta de peças a partir de CAD chegaram aos plásticos, metais e cerâmicas. Aliás, até 2009, a AM nem sequer é referenciada no Ciclo Hype Gartner. Por outro lado, em 2010 a AM é atribuída pela primeira

vez, uma estimativa de 5–10 anos para adoção dessa tecnologia em âmbito generalizado. Entre 2013 e 2015, as tecnologias AM aparecem progressivamente mais próximas do nível de produção real em muitos setores, é caso de exemplo, fase da rampa de aprendizagem - “slope of enlightenment”, passível de observar na Figura 8[27].

Nesta altura, vale a pena mencionar que a Figura 8, do Ciclo Hype de Gartner representa maioritariamente as tendências de adoção de tecnologias diferentes, e como se constata as tecnologias AM já se estabeleceram em alguns setores ao nível da produção real (maior maturidade)[27].



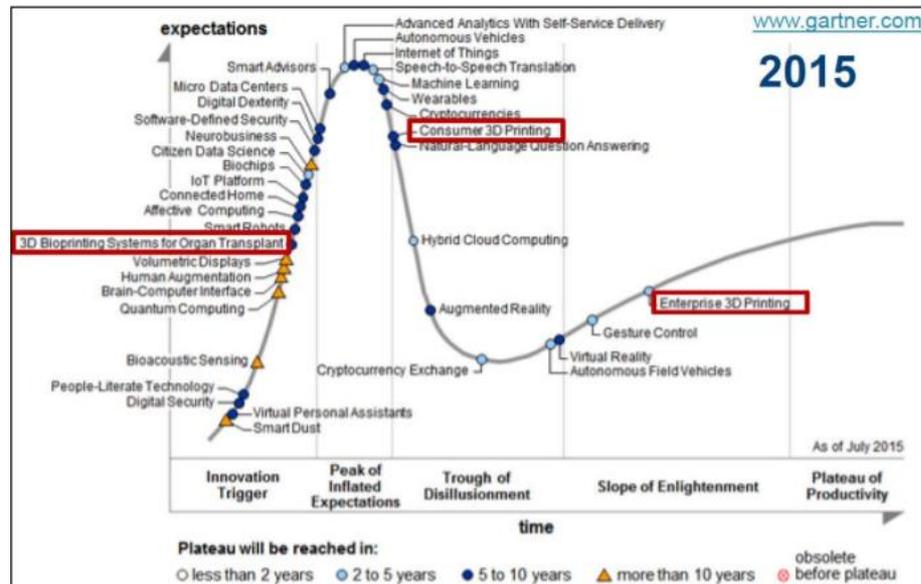


Figura 8: O ciclo de Hype de Gartner, a Evolução de Manufatura Aditiva de 2013 a 2015[27].

Estudos apontam que existem várias tecnologias de fabrico, cada uma com vantagens e desvantagens, daí ser incorreto identificar alguma das tecnologias como a ideal. Para a escolha apropriada da tecnologia a utilizar na produção de um determinado modelo, é necessário ter em conta vários aspetos como fatores físicos, mecânicos e estéticos, o material que melhor responde às necessidades pretendidas, os custos associados a cada tecnologia e por fim, os prazos para a realização do projeto[27].

As técnicas de fabrico de manufatura aditiva podem ser classificadas de diferentes formas. Uma das formas de classificação considera o estado físico inicial do material a utilizar. Assim, é possível diferenciar as técnicas de fabrico em três grupos distintos: quando o material se encontra em pó, no estado líquido ou no estado sólido. Apesar do pó também se encontrar no estado sólido, situa-se numa diferente categoria, de forma a abranger todos as tecnologias em que o material se encontra em forma de grão ou pequenas partículas. Por outro lado, quando o material se encontra no estado líquido, este é convertido para o estado sólido através do processo de polimerização, sendo que, tecnologias onde o material utilizado se encontra em forma de fio, rolo, lâminas ou pellets, são classificadas como sendo tecnologias em que o material se encontra no estado sólido. Na Figura 9, ilustram-se algumas das técnicas existentes de manufatura aditiva e as suas respetivas categorias[23].

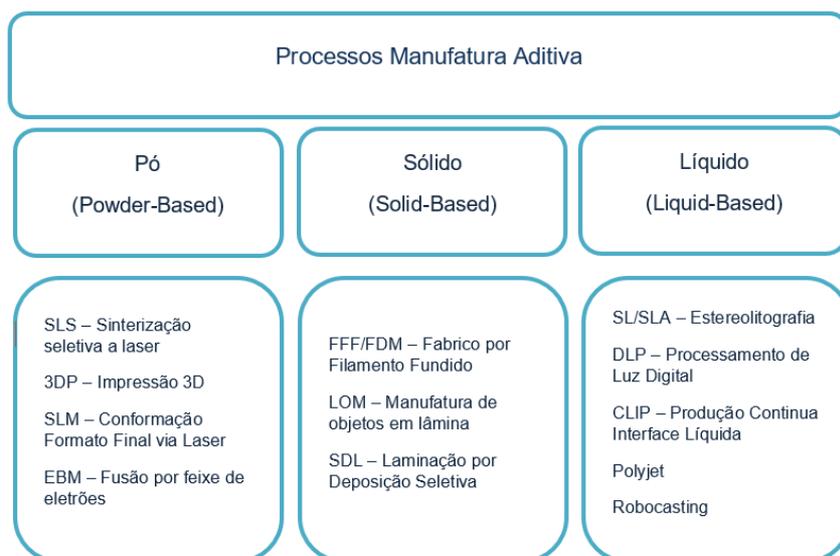


Figura 9: Diferentes processos de manufatura aditiva[23].

Todos os processos começam com a criação do modelo CAD 3D e da conversão do mesmo para formato STL Standard Tessellation Language, que representa o modelo através de uma malha constituída por triângulos. O formato do ficheiro STL, foi criado em 1987 pela empresa 3D Systems Inc. aquando do desenvolvimento da Estereolitografia, sendo o formato padrão para todos os processos de manufatura aditiva. Assim sendo, através deste formato, o modelo é descrito através de uma malha de triângulos que visa representar de forma simples o formato do modelo a imprimir. Este ficheiro contém as coordenadas cartesianas x, y e z dos nós de cada triângulo, bem como um vetor normal unitário que indica a face exterior do objeto. Quanto menor o tamanho dos triângulos da malha, mais próxima da forma real será, como se apresenta na Figura 10[26].



Figura 10: Efeito de Refinamento da malha de triângulos na forma final da peça[26].

Após definição do ficheiro STL, segue-se a validação do modelo, e eventual correção, uma vez que a malha de triângulos pode não ser gerada da forma correta, levando a posteriores defeitos geométricos do modelo. Depois de corrigido, um programa de pré-processamento prepara o ficheiro STL para a impressão, “fatiando” o modelo em várias camadas para serem impressas.

O processo de “fatiamento” do modelo apresenta alguma imprecisão, existindo a possibilidade de ocorrer o efeito de escada na superfície da peça. Uma técnica para reduzir este efeito, é criando vários arquivos STL separados e ajustados mais tarde, tendo o cuidado de atribuir à dimensão na direção z um valor múltiplo do valor da espessura da camada. Devido à elevada simplicidade dos arquivos STL, este apenas contém informações sobre a malha da superfície. Com o objetivo de melhorar a qualidade do modelo, foi criado um novo formato de ficheiro, o AMF (Additive Manufacturing File Format), que permite obter qualquer informação acerca do material, da cor, entre outras propriedades do objeto a ser impresso. A figura 11, representa de forma ilustrativa as oito etapas necessárias, em geral, para a produção utilizando manufatura aditiva[28].



Figura 11: Etapas para a produção de uma peça em manufatura aditiva[28]

Como referido, a AM tem benefícios significativos para uma vasta gama de aplicações, e impacto positivo nos elementos sociais, económicos e ambientais do desenvolvimento sustentável. As principais vantagens apontadas são[29]:

- Tempo de comercialização reduzido e rápida adaptação às exigências do mercado em constante mudança;
- Personalização do produto com flexibilidade total de design & construção;

- Poupança máxima nos materiais dado o material ser adicionado e não subtraído. A produção próxima da forma final produz uma quantidade mínima de desperdício de material e reduz as etapas de pós-processamento.
- Necessidades mínimas de processos adicionais (ex. maquinagem). Redução dos prazos e dos custos;
- A peça é obtida diretamente do seu modelo 3D CAD, desta forma são desnecessários moldes ou ferramentas;
- O potencial para design livre (sem as limitações do design do fabrico tradicional). O design para personalizar, Design para funcionalidade, Design para redução de peso.
- Densidade total das peças finais (sem porosidade residual);
- Possibilidade de fabricar canais de formas livres, cavidades internas, paredes finas, bem como formas diferentes ou estruturas (leves) reticulares;
- Amigo do ambiente, tecnologia de manufatura mais generalizada e versátil.

Dadas as características gerais das tecnologias AM e o seu potencial de aplicação, presentemente estas são recomendadas para produção de peças personalizadas de reduzida dimensão e em pequenas séries.

O impacto nos custos de produção é analisado sob duas perspetivas: o volume de produção em série e a personalização de peças, Figura 12. Por um lado, o custo de produção tem um valor constante o que beneficia as pequenas séries AM. Por outro lado, a AM permite a personalização e produção de peças complexas com uma redução nos custos. Deste modo, quanto mais pequenas forem as séries e mais complexas as formas, mais prováveis são os benefícios da AM[24].

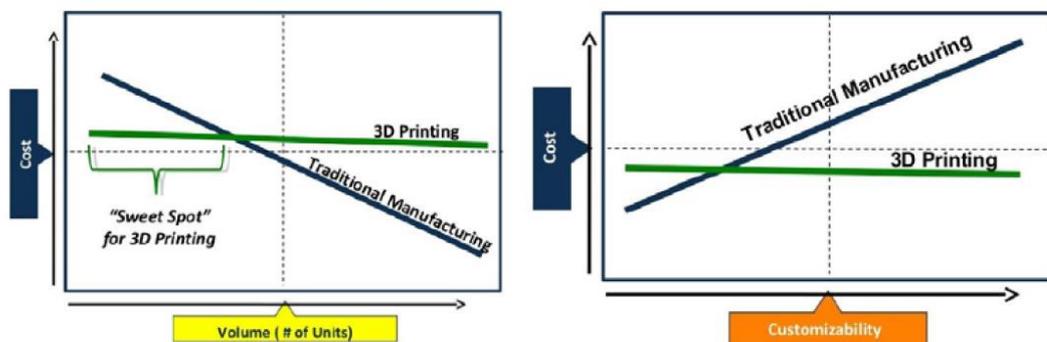


Figura 12: Impacto do volume das séries nos custos de produção (expresso em número de unidades ou volume de produção) (esquerda) e impacto de personalização nos custos de produção (direita)[24].

Para além dos benefícios apontados à utilização das tecnologias AM, é de igual forma importante conhecer algumas das limitações destas tecnologias, nomeadamente[29]:

- Séries de produção curtas. A moldagem e a fusão ainda são preferenciais para elevados níveis de produção.
- Capacidade de processamento de materiais diferentes. Apesar de estarem disponíveis muitas ligas, os metais não soldáveis não podem ser processados por AM e as ligas de difícil soldadura requerem abordagens específicas.
- Propriedades do material: as peças feitas por AM tendem apresentar anisotropia no eixo Z (direção da construção) e variabilidade do processo já que as propriedades da peça final dependem de um grande número de parâmetros, como a velocidade da construção ou a orientação da peça.
- O pós-processamento: é necessário remover os suportes do material após o fabrico. Em alguns casos a maquinagem é necessária para se obter um melhor acabamento da superfície ou precisão dimensional.
- Falta de uniformização específica.

2.2.1.1 Estereolitografia (SL ou SLA)

A Estereolitografia (SLA) foi estruturada e desenvolvida por Charle Hull. Esta técnica foi pioneira nos processos de prototipagem rápida e é considerado o processo mais abrangente no mercado. Assim sendo e dado ao potencial que apresenta, esta é uma técnica utilizada para visualização de conceitos pelo que esta permite gerar modelos tridimensionais complexos. Esta técnica caracteriza-se por ser um processo aditivo que utiliza um tanque de polímeros líquidos fotossensíveis que solidificam por ação de um feixe de radiação ultravioleta proveniente de um laser controlado por computador. Desta forma, a Estereolitografia constrói o modelo através do direcionamento de um feixe laser sobre a superfície do tanque que contém resina, polimerizando desta forma uma fina camada do objeto[30]. Após a construção de cada camada, a plataforma de suporte desce, o valor igual a espessura definida para a camada, e é sobreposta uma nova camada de resina líquida sobre a anterior. A nova camada é nivelada através de uma

faca que percorre toda a superfície do tanque, repetindo-se assim o processo. Esta estratégia, corresponde ao método de construção descendente, possível de observar na figura 13. a). Em alternativa Hull, propôs também um método de construção ascendente possível de observar na figura 13.b). Neste caso, a irradiação é efetuada através de uma janela de vidro que se encontra na base da tina que contém a resina, sendo o modelo tridimensional construído de cima para baixo, com elevação da plataforma móvel após solidificação de cada camada. Em termos práticos, no método descendente, a diferença manifesta-se ao nível da necessidade de existir um nivelador que provoque a redução das imperfeições superficiais do modelo e estabilize a superfície da resina que se encontra no estado líquido, uniformizando a espessura da camada, mas que aumenta em muito a complexidade do equipamento e o tempo de construção. O mesmo não se verifica no método ascendente, no qual a janela garante a estabilização e regularidade cada camada de resina[31].

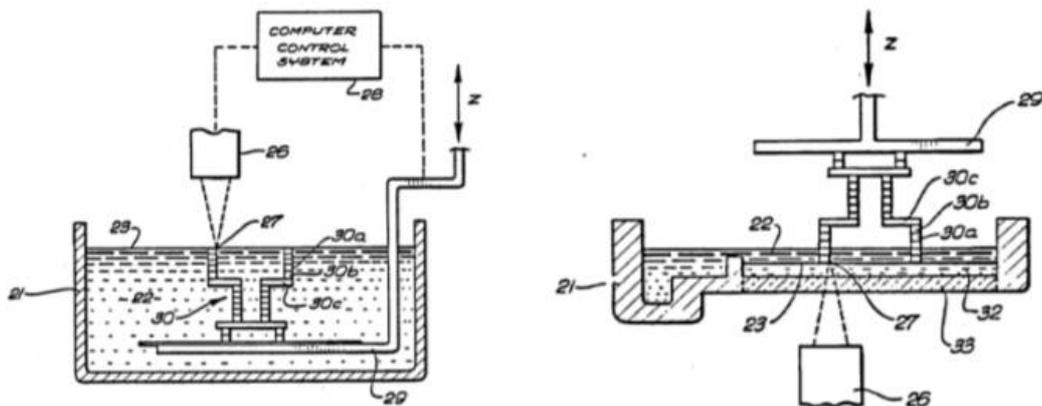


Figura 13: (a) Processo estereolitográfico de construção descendente; (b) Processo o estereolitográfico de construção ascendente[31]

Após finalizar o processo, os objetos são submetidos a um processo de lavagem com um solvente e levados a uma câmara com raios ultravioleta, onde é concluída a cura da resina, uma vez que no final do ciclo da máquina, o protótipo apresenta uma taxa de cura de aproximadamente 95%[32].

Assim sendo, como a construção de protótipos em Estereolitografia é efetuada num meio líquido, existe a necessidade de construir suportes estruturais que garantam a replicação da geometria do modelo tridimensional sem limitações, apoiando convenientemente as camadas solidificadas, que de outra forma se encontrariam em suspensão. Os suportes estruturais permitem ainda compensar eventuais desalinhamentos entre a peça e a plataforma móvel, além de reduzirem o efeito de deformações originados pela contração do material, Figura 14[33].

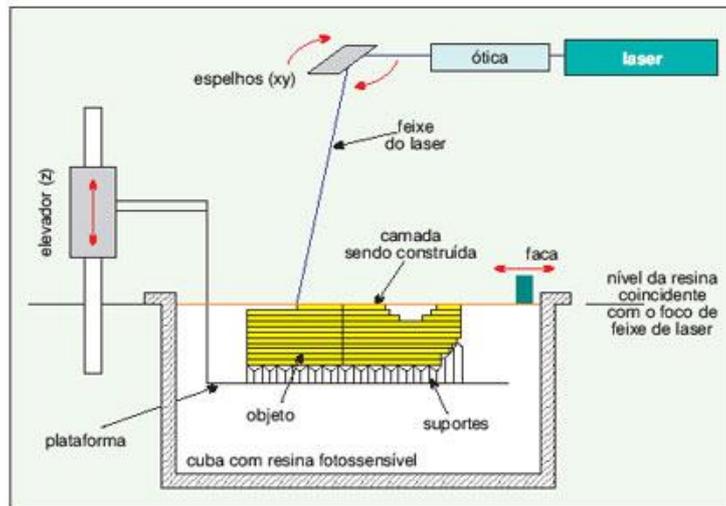


Figura 14: Esquema genérico do funcionamento da Estereolitografia[33].

A tecnologia DLP (Digital Light Processing) funciona da mesma maneira que o SL, diferenciando-se apenas na fonte de luz utilizada, ou seja, projetor de alta resolução, que projeta cada camada a ser impressa. Este aspeto permite que as peças impressas por DLP tenham um menor tempo de impressão, em relação ao SLA, visto que é projetada uma camada inteira de cada vez.

Com a expiração de patentes relacionadas com alguns processos existentes, nos últimos anos uma das tecnologias que tem suscitado maior curiosidade nos consumidores denomina-se por produção contínua em interface líquida (Continuous Liquid Interface Production – CLIP®), criado pela Carbon3D, Inc[34].

O CLIP® é um processo idêntico ao processo de SLA® que, além de utilizar um laser ultravioleta para polimerizar a resina e criar a peça, utiliza também um fluxo controlado de oxigénio com o objetivo de inibir o processo de endurecimento em zonas onde o processo é desnecessário. Assim sendo, este processo diminui a complexidade do equipamento e o tempo de construção do objeto final uma vez que os modelos são produzidos de forma ascendente. A projeção de luz é feita na parte inferior da cuba, que contém uma membrana transparente e permeável ao oxigénio conseguindo criar uma fina camada de resina não curada entre a membrana e o objeto a imprimir. À medida que a resina vai solidificando a plataforma de construção sobe. Além de se obterem tempos de impressão muito inferiores aos do SLA®, a tecnologia CLIP® permite criar peças com maior semelhança às peças fabricadas por injeção, sendo que as propriedades mecânicas não dependem da direção das camadas de impressão. Na Figura 14 mostram-se duas

imagens de microscopia eletrónica e varrimento da superfície de duas peças produzidas pelos processos (a) SLA® e semelhantes e (b) CLIP®[35].

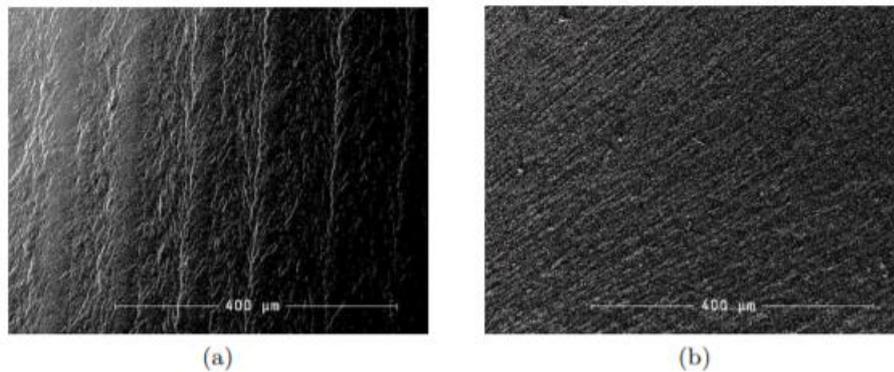


Figura 15: Superfície de duas peças produzidas pelos processos: (a) SLA® e semelhantes, (b) CLIP®[35]. Como se verifica na Figura 15, não existe diferenciação das camadas de material depositadas na imagem referente à tecnologia CLIP®. Assim, a anisotropia das peças impressas é menor nesta tecnologia do que nas tecnologias semelhantes, como é o caso do processo SLA®[35].

2.2.1.2 Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

O processo de sinterização, vulgarmente designado por sinterização seletiva por laser (SLS - Selective Laser Sintering), foi desenvolvido na Universidade do Texas por Deckard, e consiste na utilização da energia proveniente de um feixe de laser para promover a sinterização do pó, em um ambiente inerte no interior de uma câmara. Assim sendo e em conformidade com os parâmetros de processo, nomeadamente potência do laser, velocidade de varredura e diâmetro do feixe, pode-se promover a fusão parcial ou total das partículas do pó.

O equipamento consiste num rolo de nivelamento, êmbolo de armazenamento, cilindro de construção e um laser. O pó é espalhado através de um rolo sobre a superfície de um cilindro onde o modelo será construído. O cilindro desloca-se para baixo, consoante o valor da espessura da camada, de modo a receber uma nova camada de pó. O êmbolo onde o pó se encontra armazenado, com um funcionamento idêntico ao cilindro de construção, move-se para cima de forma incremental para fornecer a quantidade de pó necessária para uma camada nova. O feixe de laser incide sobre a superfície do pó compactado para o fundir seletivamente e ligá-lo formando uma nova camada do modelo. Depois do objeto estar completamente construído, o cilindro de construção sobe para remover o objeto. O excesso de pó é simplesmente retirado, estando a peça pronta para o acabamento manual. Neste processo não

são necessários suportes uma vez que o material não sinterizado serve de suporte ao modelo (cama de pó). Uma vantagem associada a esta tecnologia é a variedade de materiais possíveis de utilizar, desde polímeros, metais e cerâmicos em pó. No entanto, a peça necessita de arrefecer antes de poder ser removida da máquina, sendo que peças de grandes dimensões podem necessitar no processo de arrefecimento aproximadamente 2 dias [36],[37].

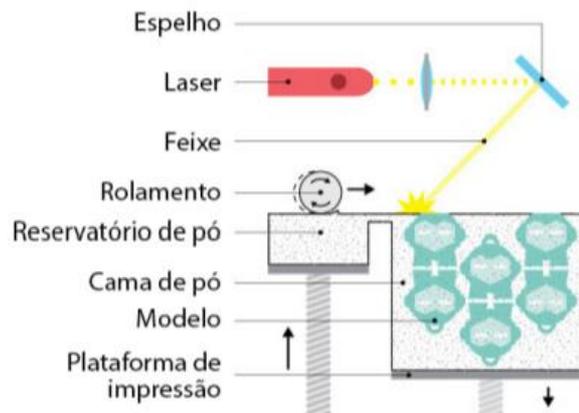


Figura 16: Desenho esquemático do processo de prototipagem rápida por SLS[37].

A tecnologia SLM (Selective Laser Melting) é em todo idêntica à SLS, diferenciando-se apenas no facto da SLM ser apenas aplicada a metais. Na fusão seletiva a laser (SLM), o feixe de laser é utilizado para fundir as partículas de metal, é caso de exemplo, as partículas que não são apenas sinterizadas, mas sim fundidas de forma homogénea. Por sua vez, o tipo de laser pode variar consoante as partículas metálicas utilizadas, recaindo as escolhas em laser de CO₂, laser Nd-YAG e laser Yb-YAG [24]. São várias as indústrias que utilizam este tipo de tecnologia, desde a indústria aeroespacial, a aeronáutica e a médica. Além da SpaceX que recorreu à utilização desta tecnologia para produzir peças da câmara de combustão do SpaceX SuperDraco, a NASA também desenvolveu com o recurso à mesma tecnologia, um turbo compressor, conseguindo reduzir o número de componentes presentes neste equipamento. A indústria aeroespacial tem sido a indústria que mais tem adotado estas tecnologias, uma vez que permitem reduzir o peso dos componentes aumentando a eficiência de construção. Na indústria aeronáutica, companhias como a Boeing e a Airbus também começam a utilizar peças obtidas por fabrico aditivo nos seus aviões. Esta tecnologia também tem vindo a ser utilizada nas áreas da saúde principalmente para a produção de implantes[38][39].

2.2.1.3 Fabrico por Filamento Fundido (FFF)

O processo de deposição de material fundido, FDM, foi inventado por S. Scott Crump em 1989. Este processo de Manufatura aditiva é baseado na deposição por extrusão de termoplásticos aquecidos, apesar dos fundamentos do processo permitirem a sua aplicação a uma grande variedade de materiais, tais como: ceras, termoplásticos, metais e elastómetros[24].

Com a expiração de pelo menos uma das patentes de S. Scott Crump permitiu a empresas como a RepRap desenvolver os próprios sistemas de extrusão e utilizar a designação Fused Filament Fabrication (FFF) para fornecer um termo legalmente irrestrito na sua utilização[24].

Neste processo de manufatura aditiva, o material encontra-se armazenado na forma de bobines que alimentam de forma direta um cabeçote extrusor e que se movimenta no plano xOy . Esse cabeçote extrusor, aquece o material até uma temperatura ligeiramente superior à temperatura de fusão deste, com o propósito de atingir o seu ponto de fusão, permitindo assim, aumentar a adesão entre camadas. O material é extrudido através do bico extrusor e depositado posteriormente numa plataforma, que poderá ou não ser aquecida para diminuir o gradiente de temperatura, permitindo obter uma menor concentração de tensões na peça final. Assim sendo, a plataforma onde o material é depositado, movimenta-se no eixo Oz de forma descendente, movimentando-se à medida que uma camada do modelo é terminada. A distância percorrida toma o valor da espessura dessa camada, para ocorrer a deposição da camada seguinte.

Na possibilidade de ser necessário recorrer à utilização de suportes, estes são extrudidos e depositados da mesma forma da peça final. De salientar, o material utilizado na construção dos suportes é o mesmo material do modelo, podendo ser diferente caso haja um segundo bico extrusor. Quando concluída a impressão, o material de suporte é simplesmente retirado manualmente. Na Figura 17, está representado o funcionamento do processo FFF[37][40].

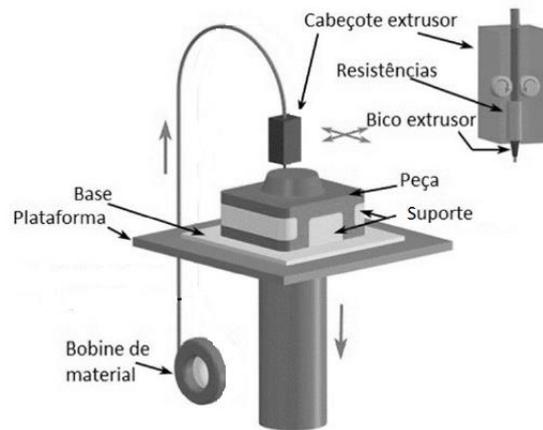


Figura 17: Desenho Esquemático do processo Fabrico por Filamento Fundido – FFF[40].

Da lista de materiais existente para utilização do FFF, existem dois materiais mais utilizados e com elevada preponderância, destacando-se, o ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) e o PLA (Ácido Polilático).

Numa fase inicial, o ABS era o material mais utilizado, por ser relativamente barato e bastante conhecido industrialmente. Contudo, este polímero apresenta um elevado grau de deformabilidade, sendo uma desvantagem para algumas aplicações. Com o desenvolvimento do processo, começaram a ser equacionadas possíveis alternativas ao ABS. O PLA surgiu como uma das alternativas. Uma das vantagens do PLA face ao ABS, é a necessidade do ABS requerer uma plataforma aquecida (cerca de 100 °C) para uma boa impressão, ao contrário do PLA. O PLA, sendo um material mais rígido, apresenta menos deformações do que o ABS. No que diz respeito a um nível ecológico, o PLA tem a vantagem de provir do amido de milho, ao contrário do ABS (origem petrolífera). Dependendo do equipamento de impressão utilizado, polímeros como o PC (Policarbonato), PA (Poliamida), PVA (Acetato de Polivinilo) e o PEEK (Poli (éter éter cetona)), também podem ser utilizados em conformidade com aplicações mais específicas. Também é possível utilizar polímeros que resultam da combinação dos anteriormente referidos, tais como o ABS-PC[41][42].

Recentemente com a crescente utilização da nanotecnologia e nanomateriais, uma abordagem seguida, tem sido o reforço de matrizes poliméricas com nanopartículas, tais como nanotubos de carbono e grafeno, melhorando assim as propriedades finais dos materiais[41].

Em relação a máquinas industriais, é possível imprimir com outros materiais tais como o polieterimida (PEI), mais conhecido como ULTEM® 9085, que já começa a ser utilizado na área aeroespacial[41].

A Figura 18 demonstra, de forma resumida, alguns dos materiais utilizados na tecnologia FFF. Os materiais mais utilizados encontram-se na camada mais exterior, estando presentes alguns materiais obtidos através da junção de polímeros já utilizados, na camada intermédia. A camada nanopartículas, refere-se à possibilidade de incorporar nanopartículas nos materiais utilizados usualmente no processo de FFF[43].

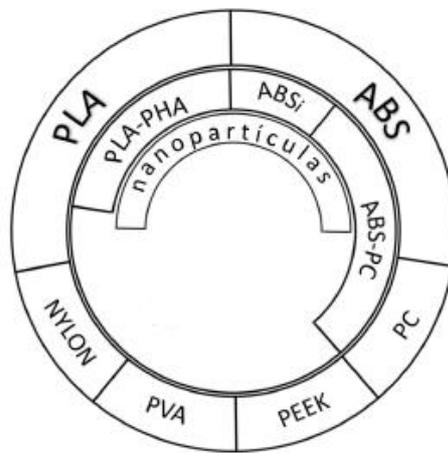


Figura 18: Materiais utilizados na FFF[43].

Na tabela 1 é possível analisar as propriedades entre o PLA e o ABS e estabelecer um termo de comparação entre ambos[43].

Tabela 1: Tabela comparativa entre o PLA e o ABS[43].

	PLA	ABS
Origem do material	Amido de milho	Petróleo
Propriedades	Resistente Frágil	Resistente Ligeiramente flexível Resistente ao calor

Temperatura de extrusão (°C)	190 - 220	210-240
Warping	Menor	Maior
Odores aquando da impressão	Não	Sim

2.2.1.4 Impressão 3D

A impressão 3D é um processo desenvolvido pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (*MIT*), em 1993.

O processo consiste na deposição de uma camada de material em pó no cilindro de construção, pó esse que se encontra armazenado e é fornecido através do movimento de um êmbolo. De seguida, o rolo de nivelamento distribui e comprime o pó. Posteriormente, um jato de uma solução aquosa é depositado nas zonas a imprimir, unindo o pó e construindo a camada de acordo com o modelo. A partir do momento em que a camada está completa, o cilindro de fabrico move-se para baixo e o processo é repetido até o objeto estar completamente produzido. Assim sendo, tal como o processo SLS anteriormente referido, não é necessário suportes externos durante o fabrico, uma vez que, o pó serve de suporte ao modelo. O funcionamento de ambas as tecnologias de fabrico são bastante idênticas, variando apenas na maneira como o pó é aglomerado. A impressão 3D tem como vantagens o baixo preço dos materiais e o fabrico ser mais rápido do que a maior parte dos restantes processos de fabrico rápido, sendo que, também é possível a impressão a cores. Porém, a baixa resolução, baixa qualidade de acabamento e modelos frágeis são algumas das desvantagens associadas a esta tipologia de processo. Este processo recebe a denominação de impressão 3D, uma vez que apresenta semelhanças com o processo de impressão a jato de tinta, que é utilizados nas impressões bidimensionais em papel[36][37].

A Figura 18 corresponde à representação esquemática do processo de Impressão 3D[42].

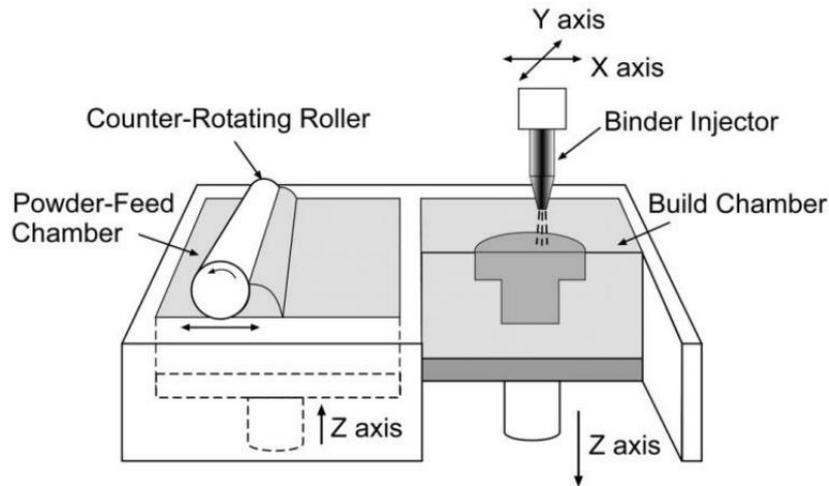


Figura 19: Desenho esquemático do processo 3DP[42].

2.2.1.5 Robocasting

O *Robocasting* é uma tecnologia de fabrico aditivo direcionada para materiais cerâmicos e compósitos, desenvolvida nos *Sandia National Laboratories*.

Na Figura 2.0 está esquematizado de forma ilustrativa o processo de *Robocasting*. Assim sendo, este processo baseia-se na deposição de camadas, onde o material utilizado se encontra numa espécie de pasta, suspensão ou líquido. Normalmente, o material é constituído por 50-65% de pó de cerâmica, 35-50% de solvente volátil (tipicamente água) e <1% de aditivos orgânicos. Uma das vantagens do *Robocasting* é a mudança quase instantânea do material para o estado sólido depois de depositado, sem a necessidade de reações de polimerização para que ocorra essa transformação. A deposição é feita através de controlo computadorizado, por um orifício que pode chegar à décima de milímetro. Este processo permite produzir, secar e sinterizar peças cerâmicas em menos de 24 horas [44].

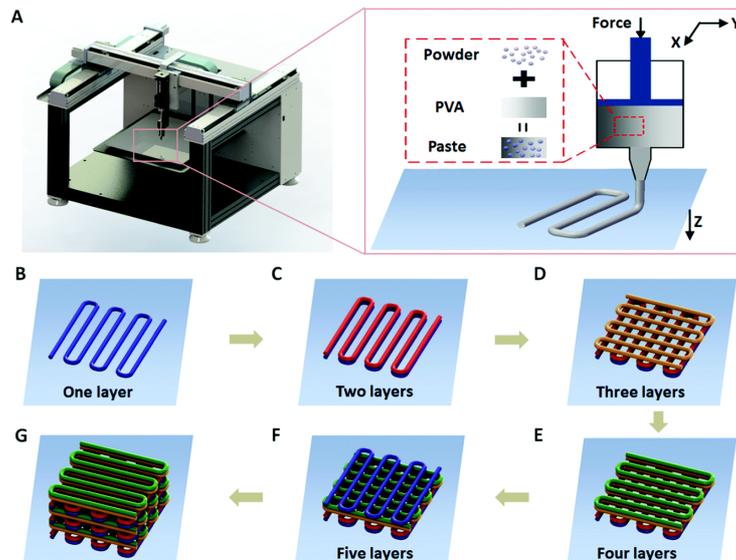


Figura 20: Desenho esquemático do processo Robocasting[45].

2.3 Materiais a Utilizar

A evolução das tecnologias despoletou a evolução e desenvolvimento dos materiais, que correm a um ritmo acelerado de forma a acompanhar a nova era de inovação. Desta forma diversos são os materiais utilizados para aplicações de Manufatura Aditiva, esta gama de materiais vai desde os poliméricos aos cerâmicos, passando ainda pelos metálicos.

Ao nível dos materiais de natureza polimérica, comumente utilizados ao nível de tecnologias de processamento, como é o caso de exemplo a tecnologia FDM. Assim sendo, o polímero caracteriza-se por qualquer material orgânico ou inorgânico, sintético ou natural, que apresente um alto peso molecular e com variedades estruturais repetitivas, sendo que normalmente esta unidade que se repete é de baixo peso molecular. De salientar, existem diversas classificações de polímeros, sendo que cada classificação tem por base a sua área de aplicação. No que toca ao nível do processamento de plásticos, do ponto de vista tecnológico, a principal divisão de polímeros divide-se em termoplásticos e termoendurecíveis[46].

Os polímeros termoplásticos podem ser submetidos a ciclos de fundição e solidificação diversas vezes, com pouca ou nenhuma variação das suas propriedades básicas[47].

Por outro lado, os termoendurecíveis, ou termofixos, são polímeros que não podem ser repetidamente fundidos ou dissolvidos sem que haja degradação da sua estrutura química após sofrerem o processo de cura, ou seja, formação de ligações cruzadas[47].

Os polímeros podem ser amorfos, cristalinos ou apresentar uma percentagem dos dois na sua composição (semicristalino). Esta percentagem depende de diversos fatores, como estrutura molecular, peso molecular, processamento mecânico, entre outros[48].

Polímeros amorfos (do grego, *a*, sem, *morphous*, forma) não apresentam forma definida. Este tipo de polímeros, podem ser representados como longas cadeias flexíveis entrelaçadas, sem uma orientação específica. Por outro lado, polímeros cristalinos são compostos por estruturas altamente organizadas e compactas denominadas cristais. Um cristal pode ser formado por moléculas que se dobram sobre si mesmas e se empilham sobre outras moléculas igualmente dobradas[46].

Existem duas grandezas de vital importância para a caracterização dos polímeros: a temperatura de transição vítrea, T_g , e a temperatura de fusão cristalina, T_m . A temperatura de transição vítrea, está associada à natureza amorfa dos polímeros. Nesta temperatura ocorre gradualmente a migração de um estado vítreo (sólido) para o estado fluído (plastificado), gradualmente. Portanto, abaixo de T_g , as moléculas apresentam-se quase totalmente imóveis, sem movimentação, apenas apresentam vibração parcial. Por outro lado, acima de T_g as moléculas apresentam um aumento expressivo na movimentação browniana, sendo mais facilmente deformáveis por tensão de corte. A temperatura de fusão cristalina, é a temperatura onde ocorre a mudança de estado, ou a mudança de fase (cristalina para amorfa) do polímero. Nesta temperatura ocorre uma alta absorção de energia para a dissolução dos cristais[49]. Depois de T_m todo o material se encontra num estado amorfo, e caso o material seja totalmente amorfo não possuirá T_m , uma vez que não existe fase cristalina para ser transformada. Os polímeros são compostos basicamente por resinas e aditivos, sendo a resina o composto principal, conferindo nome ao polímero, e os aditivos são compostos adicionados para mudar certas propriedades do polímero, adequando-o a um uso específico, nomeadamente[50]:

- Nafta → é um derivado do petróleo e é matéria prima dos monómeros mais importantes.
- Resina → é o componente básico na forma granulada e que determina a classificação do plástico. As resinas que mais se destacam pela facilidade de processamento, e baixo preço são o Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS) e Policloreto de Vinila (PVC). Já as principais resinas de alto desempenho são o Policarbonato (PC), Poliacetal (POM), Poliamida (PA) e Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS).
- Plastificante → são líquidos que entram em ebulição a temperaturas de 96°C a 202°C e tem a finalidade de melhorar a fluidez do material.

- Lubrificante → Tem o propósito de impedir a adesão do plástico. Os mais utilizados são: óleo de rícino, óleo de linhaça, lanolina e parafina.
- Corante → responsável pela coloração do material plástico.
- Catalisador → controla o grau de polimerização da resina.
- Estabilizante ou Antioxidante → é um aditivo que tem como objetivo evitar o ataque do plástico pelo oxigénio ou ozono presentes no ar, impedindo também a deterioração devido à ação da radiação ultravioleta, radioatividade, calor e intempéries.
- Termo estabilizante → minimiza o efeito danoso de altas temperaturas sobre o plástico.
- Massa ou carga inerte → é um material inerte, fibroso e que além de dar maior resistência ao plástico, reduz o custo de fabrico. São utilizados como carga inerte o pó de madeira, papel, algodão, grafite, talco, pó de mica e pó de pedra.
- Carga de reforço → é um material que tem como objetivo aumentar a resistência mecânica do plástico. A mais utilizada é a fibra de vidro.
- Retardadores de Chama → aditivo anti chama que torna o polímero auto extingüível.

De todos os materiais poliméricos os que mais se destacam dado às suas propriedades são ABS e PLA. Os polímeros podem dividir-se em cinco categorias, sendo estes categorizados por convencionais, flexíveis, compósitos, especiais e para suporte. Cada tipo de filamento tem características próprias, no entanto dependem diretamente da temperatura do extrusor e da cama. Na tabela 2 é apresentada uma vasta gama de materiais e as temperaturas ideais para a sua utilização[51][53][36].

Tabela 2: Comparação de temperaturas de impressão de vários materiais[53][36].

	Material	Temperatura Extrusor (°C)	Temperatura Cama (°C)
Filamentos Convencionais	PLA (Polylactic Acid)	180-220	20-55
	ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene)	220-260	80-110
	Nylon (Polyamide)	235-270	60-80
	PET (Polyethylene Terephthalate)	230-255	55-70
Filamentos Flexíveis	TPE	210-225	20-55
	Soft PLA	220-235	20-55
	TPU (Thermoplastic TPU)	240-260	40-60
	LAYBRICK	180-200	20-55
	LAYWOOD-D3	175-250	30
	Conductive ABS Filament	225-260	90-110

Compósitos	LayCeramic	260-275	20-55
	Carbon Fiber Reinforced PLA	195-220	50
	Steel PLA	195-220	50
	Magnetic Iron PLA	185	20-55
	Fill Series	190-210	20-55
	Lay-Felt	225-235	20-55
	Gel-Lay	225-235	20-55
	LAY-FOMM 60	220-230	40-60
Filamento Especiais	PC (Polycarbonate)	270-310	20-55
	Bendlay	210-240	20-55
	MoldLay	170-180	20-55
Filamentos para Suporte	PVA (Polyvinyl Acetate)	170-190	45

Ao nível dos cerâmicos estes são considerados materiais sólidos, inorgânicos e não metálicos. Este tipo de materiais possuem elevada resistência química quando sujeitos a elevadas temperaturas, e são aplicados na indústria de diversas formas. Por outro lado, estes materiais são frágeis e muito duros, o que dificulta a produção com as tecnologias de manufatura tradicionais. Assim sendo, o desenvolvimento de manufatura aditiva traz inovações ao processo destes materiais, tornando mais rápido e com menor custo o fabrico de peças cerâmicas, mesmo aquelas que apresentam uma geometria complexa[45].

Os processos FDM, SLS, 3DP e SLA possuem a capacidade de processar cerâmicas industriais, como Si₃N₄, Al₂O₃, SiO₂ e ZrB₂, cerâmicas avançadas, como o PZT (Titanato Zirconato de Chumbo) e cerâmicas biocompatíveis, como a hidroxiapatita. É fundamental referir que as peças que utilizam tais materiais são produzidos por um processo indireto, no qual a matéria prima utilizada contém agentes aglutinantes para garantir a solidez da peça. Por outro lado, o fabrico de peças por processos diretos, ou seja, que realizam a fusão do pó cerâmico puro, ainda são processos em desenvolvimento, sendo que peças de zircónia já foram produzidas experimentalmente com o processo de SLM e peças de alumina já foram fabricadas experimentalmente pelo processo LENS[29].

Ao nível do processamento de peças metálicas, estas podem seguir dois tipos de processos: (i) indiretos, nos quais um material é utilizado para unir as partes metálicas; (ii) diretos, permite a fundição completa do metal[25].

Assim sendo, os processos indiretos podem ser aplicados para manufaturar peças tanto pela fusão de um metal auxiliar que garante a união das partes como pela fusão parcial do metal utilizado como matéria-prima, nos processos denominados de sinterização. O pó de metal é a

matéria-prima utilizada, e é necessário que ocorra um pós-processamento quando se utilizam processos indiretos para construir peças metálicas. Assim sendo, os materiais que se destacam e são comumente utilizados nestes processos são: o aço Inox GP1, PH1 e 17-4, ligas de cobalto cromo MP1, titânio Ti6Al4V, ligas de Inconel 718, aço MS1 e ligas de alumínio AlSi20Mg[40]. Por outro lado e com destaque, para os processos diretos, que se caracterizam por realizar a fusão completa do metal para produzir a peça, como é caso de exemplo SLM e EBM. Ao nível deste processo os materiais mais utilizados são aço H13, 17-4 PH, PH 13-8 Mo, 316 L e 420, alumínio 4047, titânio TiCP, Ti-6-2-4-2 e Ti6-2-4-6, ligas de Inconel 625, Inconel 617 e de Cu-Ni. Estes processos produzem peças com densidade e propriedades mecânicas similares às produzidas por processos de manufatura convencionais[36].

2.4 Aplicações

A presença de tecnologias de Fabricação Aditiva por algumas décadas, bem como a redução dos custos, aumento da agilidade de processamento e construção, aliados com maior variedade de materiais e melhorias gerais no processo, possibilitaram a inserção da Fabricação Aditiva na indústria. Esta prática permite gerar produtos, desta vez finalizados, sem passar por processos de produção envolvendo moldes e ferramentas convencionais[54].

2.4.1 Medicina e Bioprinting

O uso da Impressão 3D na Medicina é uma das aplicações mais impactantes e significativas. Segundo estudos desenvolvidos, as aplicações ocorrem a diversos níveis, como é caso de exemplo, equipamentos médicos, próteses, cartilagens de orelha, pele, válvulas cardíacas, ossos e até mesmo órgãos[55].

3D Bioprinting, segundo Murphy e Atala (2014), é a impressão de materiais biocompatíveis, como células e componentes de tecidos funcionais complexos. É utilizado na medicina regenerativa para transplante e regeneração de tecidos e órgãos em pacientes. Nesta área estão as aplicações mais ambiciosas da impressão 3D, segundo Mesko (2015) há vários estudos sendo desenvolvidos e já capazes e operacionais de promover o *3D Bioprinting*: um estudo desenvolvido pela Universidade do Estado de Washington em 2011, modificou uma impressora 3D para ligar químicos com cerâmica em pó, criando estruturas intrínsecas capazes de promover o crescimento de ossos. Em paralelo a este estudo, um pesquisador na Escola de

Medicina de Wake Forest, nos EUA, desenvolveu uma impressora capaz de imprimir pele sintética diretamente sobre as feridas de vítimas de queimaduras e incêndios. Outro caso de sucesso, remete para um pesquisador da Universidade de Cornell, que criou por meio de molde tridimensional preenchido com um gel contendo cartilagem bovina e colágeno enquanto as células se reproduziam. Outro exemplo surge na Universidade de Cornell, que foi capaz de imprimir uma válvula cardíaca que se fundamenta na combinação de algina, células musculares, capazes de controlar a elasticidade da válvula e a empresa Orgonovo, que criou, por impressão 3D, um fígado com células funcionais capazes de funcionar por 40 dias, sendo utilizado para testar fármacos, mas com planos para criar órgãos funcionais que possam ser transplantado em pacientes que aguardam doação de órgãos[56]. Uma imagem da orelha impressa na Universidade de Cornell está demonstrada na Figura 21[55].



Figura 21: Orelha impressa através de Impressora 3D[56].

2.4.2 Arte e Moda

De acordo com a evolução sentida ao nível das tecnologias, a Fabricação aditiva potenciou uma mudança radical nas áreas da Moda e Arte, permitindo inúmeras novas possibilidades, como recriar obras-primas, imprimir novos e inovadores instrumentos musicais, criação de animações estilo stopmotion, esculturas, réplicas de artefatos históricos e até mesmo sons. No que diz respeito ao ramo da Moda, a Fabricação Aditiva permite a criação de peças diretamente do design e peças que possuem conexões eletrônicas[57].

2.4.3 Construção Civil

As aplicações da impressão 3D na construção e na arquitetura são amplas e vão além de maquetes e projetos com pequenas dimensões. No ano de 2015, segundo estudos apresentados por Starr (2015) a empresa holandesa, MX3D, planeou a criação de uma ponte de aço na cidade de Amsterdão, Holanda, que atualmente já se encontra com forma[58]. O projeto, ilustrado na

Figura 22, consiste em um robot capaz de imprimir pequenas linhas de metal, que juntas criam estruturas complexas e resistentes. Estudos apontam que o robot possui a capacidade de atuar autonomamente, criando as próprias estruturas de suporte[59].

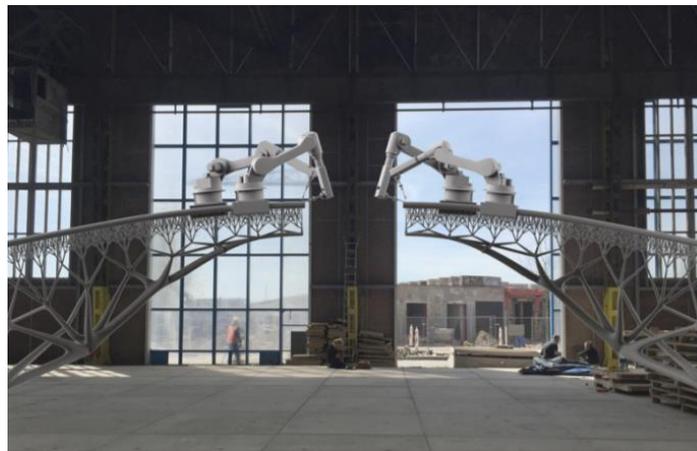


Figura 22: Ponte por Impressão 3D[59].

Segundo Hall (2016), a empresa chinesa Hushang Tengda, criou na cidade de Beijing uma casa de 400 metros quadrados utilizando um braço robótico aliado a uma impressora 3D. Segundo este estudo, a casa possui paredes com 250mm de espessura e tem estrutura para suportar um terremoto de até 8 pontos na escala de Richter. Além disso, o tempo que a casa levou para ser construída foi de apenas 45 dias e, segundo o estudo, e através de métodos comparativos, caso a casa fosse construída por métodos tradicionais, levaria pelo menos três meses[60].

A empresa italiana WASP possui uma impressora 3D capaz de criar casas por meio de argila. Esta impressora encontra-se instalada ao nível de uma estrutura de 12 metros e foi projetada com o propósito de suprir o crescimento populacional, promovendo a criação de residências em locais mais pobres e necessitados[60].

2.4.4 Automóvel e Aeroespacial

A AM emergiu como uma tecnologia chave, uma vez que possui a capacidade de reduzir o design do produto e o ciclo de tempo destinado ao desenvolvimento de forma eficaz. Esta tecnologia tem vindo a ser explorada pelos fabricantes, com o propósito de introduzir no mercado novos produtos de forma previsível e rápida. Assim sendo, o setor aeroespacial, identifica oportunidades associadas à utilização desta tecnologia, devido à capacidade que apresenta em fabricar peças metálicas diretas, como é caso de exemplo o titânio (adequado para aeronaves), e a capacidade de fabricar produtos complexos e de alto desempenho[24]. Atualmente, EBM e

SLS são processos muito utilizados para o fabrico de componentes destinados às aeronaves. as aplicações da AM mais interessantes são o fabrico das peças de baixo peso e as soluções de engenharia. O principal objetivo da indústria aeroespacial é conseguir estruturas de baixo peso que assegurem o ensaio à segurança do sistema. Além disso, os componentes de elevado desempenho podem ser produzidos pela tecnologia da AM e numa vasta gama de ligas: aços inoxidáveis, ferramentas em aço, ligas de níquel, titânio Ti64, ligas de cobre, alumínio, etc. Peças diferentes como a pás de turbina ou tubos de entrada podem ser obtidos por ambos os métodos de SLM e EBM[26].

E ainda, entre todas as áreas de aplicação potencial da AM, a indústria automóvel oferece provavelmente as oportunidades mais significativas de mudança na forma de fabrico. As limitações do design atualmente impostas ao designer do automóvel, causadas pelas limitações do design de instrumentação serão eliminadas. A indústria automóvel de desporto e os fabricantes de produção de carros em geral utilizam a tecnologia AM para muitos produtos destinados ao utilizador final[26].

Diversos estudos desenvolvidos estabelecem termos de comparação para avaliar os processos tradicionais de fabricação, tais como fundição por gravidade, perfuração cruzada e rebarbação eletroquímica com processos AM para a fabricação de peças aeroespaciais e automotivas. Assim sendo, foi possível concluir que quando a mesma peça era fabricada através de AM, possuía as mesmas propriedades mecânicas e utilizada 40% menos de matéria-prima. Outro estudo (Raja et al., 2006) demonstrou que as tecnologias AM permitem ao setor aeroespacial atingir os seguintes benefícios[61]:

- Redução do lead time de introdução de produtos: 30% a 70%;
- Economia em custos de introdução de produtos não recorrentes até 45%;
- Redução de 30% a 35% nos custos de fabricação para peças de serviço de baixo volume.

2.4.5 Agricultura

Estudos demonstram que os avanços da tecnologia têm potenciado a evolução dos sistemas produtivos na agricultura. A Fabricação aditiva tem contribuído para a mudança ao nível da indústria agrícola, onde recorrem a este tipo de tecnologia para criar protótipos e peças funcionais. Bennet afirma que em conformidade com a diminuição dos custos aumenta a eficiência produtiva, através da introdução desta tecnologia na agricultura tendem a atingir a expansão. O estudo desenvolvido também afirma que a Fabricação Aditiva permitirá que os

agricultores se tornem mais autossuficientes, podendo gerar as próprias peças contando somente com o design do produto. Por outro lado, e no que diz respeito aos revendedores locais poderão fornecer partes de reposição temporárias utilizando Impressoras 3D enquanto aguardam pela reposição permanente oriunda dos fabricantes. De acordo com Bernard especialista da Universidade Estadual de North Dakota, de forma acompanhar as novas tecnologias caminha a passo largo a evolução dos materiais, como é caso de exemplo, o ácido polilático (PLA). De acordo com o especialista, este bioplástico é formado a partir do amido de milho ou dextrose, e possui a capacidade de gerar produtos mais resistentes e com menor custo associado[62].



Figura 23: Material impresso por meio do PLA[63].

De acordo com o estado da arte, atualmente, empresas utilizam esta tecnologia para análises de protótipos, permitindo mudanças no design de peças sem ter quaisquer gastos com moldes e criação do processo produtivo, permitindo que o consumidor final obtenha acesso ao produto e otimizações rápidas[63].

3 Tendências e Oportunidades

O setor industrial português encontra-se numa fase de reestruturação das suas atividades, com apostas não só na modernização como também na internacionalização, essenciais para um crescimento equilibrado.

A digitalização da sociedade e da indústria forneceu ao consumidor final as ferramentas para estar mais informado sobre a oferta global. Esta nova realidade criou um ambiente mais competitivo onde só as empresas mais dinâmicas, modernas e inovadoras podem singrar e atingir um crescimento equilibrado. O recurso às tecnologias ao dispor no mercado e o foco no cliente, são os ingredientes essenciais que vão ditar o sucesso do tecido empresarial inerente aos desafios dos mercados atuais[64].

A nova política industrial pretende acabar não só com as falhas de mercado, mas também com as lacunas presentes nas áreas de inovação tecnológica, viabilizando uma interação com novos mercados com grande potencial de crescimento e estimulando a competitividade entre as empresas. O conjunto de medidas tem como objetivo criar riqueza e empregos de qualidade permitindo aumentar o leque de oferta de bens e serviços transacionáveis[64].

A Confederação Empresarial Portuguesa (CIP) propôs um novo programa de desenvolvimento da indústria e dos bens transacionáveis - uma espécie de PEDIP para o século XXI – sendo as medidas a implementar de curto, médio e longo prazo. As políticas protagonizadas orientam-se para o desenvolvimento tecnológico, a inovação, o financiamento e fiscalidade e de uma forma geral, para a redução de custos. Todo o projeto de desenvolvimento tem como principal fonte de financiamento os Fundos Comunitários do Programa Portugal 2020 bem como os Programas Europeus Horizonte 2020, Cosme e o Connecting Europe Facility (CEF)[65].

O crescimento da economia portuguesa só será possível com investimento em unidades produtivas de bens transacionáveis. O processo de reindustrialização tem o apoio financeiro do Programa Portugal 2020 e associa-se a uma política industrial baseada em operações de mercados internacionais abertos e concorrenciais. Significa também proceder à realocação dos recursos para a produção de bens e serviços. Um desses recursos é o fator humano revisto nas vertentes de qualidade e quantidade. A força laboral portuguesa no seu conjunto tem níveis de formação insatisfatórios, no entanto compensados por elevados graus de motivação, flexibilidade e capacidade de aprendizagem e nas apostas das empresas na formação contínua dos seus colaboradores. Para as empresas terem sucesso na implementação das novas

tecnologias, nasce a necessidade de criar e desenvolver uma cultura digital que passa pela formação da próxima geração, para que se sinta confortável para trabalhar com as novas tecnologias. De acordo com a PwC (PricewaterhouseCoopers), o nível médio de digitalização das empresas do setor industrial deverá crescer de 33% para 72% dentro de 5 anos. As empresas preveem investir cerca de 5% das suas receitas anuais em digitalização com uma previsão de retorno situada em 2 anos[65].

Com o objetivo de criar condições para o desenvolvimento da indústria e serviços nacionais na era digital, o Ministério da Economia lançou uma iniciativa – Portugal I4.0 - para identificar as necessidades do tecido industrial e implementar medidas com o objetivo de tornar Portugal um polo atrativo para o investimento e promover empresas tecnológicas portuguesas a nível internacional. Foram criadas seis medidas para serem implementadas nos eixos considerados de atuação prioritária[66]:

1. Capacitação dos Recursos Humanos; adaptação dos conteúdos formativos de ensino nacional às novas tecnologias;
2. Cooperação tecnológica; implementação de soluções e tecnologias inovadoras;
3. StartUp I4.0 - papel das startups na inovação tecnológica;
4. Financiamento e apoio ao investimento em projetos no âmbito da Indústria 4.0;
5. Internacionalização; promover a tecnologia portuguesa para o mercado externo;
6. Adaptação legal e normativa, enquadrada com os desafios da nova revolução industrial.

Numa perspetiva global e com as principais empresas a viverem uma profunda transformação digital a indústria enfrenta grandes desafios. A gestão, análise, recolha de informação e comunicação são os elementos que uma vez tratados vão servir de alicerce para a criação de novos valores no setor industrial[3].

Os consumidores exigem cada vez mais novidades, de preferência artigos customizados com grande qualidade, mas a preços competitivos e tempos de entrega relativamente curtos. Por outro lado, os produtos são fabricados a partir de recursos cada vez mais limitados e obedecendo a conceitos de sustentabilidade mais rigorosos. Para tornar possível este cenário, o mundo real e o virtual têm de convergir para “a Internet das Coisas”. Todas as máquinas passam a estar ligadas umas às outras e todas os materiais necessários para a elaboração de um produto vão possuir dispositivos digitais internos. Este princípio baseia-se num fluxo de informação de ponta a ponta, ou seja, inicia-se na fase do design do produto, passa pelo processo de fabrico, comercialização e finalmente termina com a reciclagem (as informações

armazenadas digitalmente vão permitir identificar as partes do produto que podem ser reutilizadas)[67].

Atualmente os bens são entregues aos consumidores através de um processo padrão, ou seja, existe uma necessidade de mercado que vai ser avaliada e daí retirada uma previsão de vendas para um determinado período. Com base nessa informação é despoletada uma encomenda e a aquisição das matérias-primas necessárias. Em circunstâncias normais o intervalo entre o pedido de encomenda e a sua entrega é relativamente curto. No entanto, este processo envolve um conjunto de incógnitas que podem perturbar ou atrasar a entrega, porque na generalidade a indústria trabalha de forma independente em relação aos fornecedores, clientes e marketing[68].

Com a digitalização dos processos e serviços (cloud, big data, Internet das Coisas, impressão 3D, realidade aumentada) criam-se novos cenários de negócios e de fornecimento das matérias-primas. Oferta e procura são avaliadas automaticamente em rede, permitindo antecipar cenários como, eventuais falhas de matérias-primas, um aumento invulgar na procura entre outras situações. Outro aspeto a destacar é o substancial ganho em eficiência e consequentes benefícios económicos ao longo de todo o processo[69].

Assim sendo, esta mudança de paradigma aliada com a digitalização, permite que toda a atividade de fornecimento de matéria-prima passa a ser o processo chave ou elemento central para toda a indústria que comercializa ou fabrica. A transformação inicia-se com a criação de uma relação entre os processos de produção e logística com os seus respetivos sistemas de tecnologia de informação. Criam-se ligações entre todos os intervenientes, nomeadamente os fornecedores de matéria-prima, armazenistas e distribuidores de produto acabado até ao próprio consumidor final. A informação ao longo do processo de produção é obtida praticamente em tempo real pois a digitalização torna os processos completamente transparentes dado existir interligação entre o fornecedor de matéria-prima, produção do bem, transporte, comercialização e aquisição[69].

Um dos maiores contributos obtidos resume-se na facilidade de integrar dados e processos com os parceiros externos, obtendo-se ganhos em eficiência operacional e redução dos custos. Do ponto de vista tecnológico é possível a interconexão com as cadeias globais de fornecimento de valor, criando um novo paradigma de produção que permite a agilização dos processos e a facilidade de adaptação a mudanças. Os intervenientes nos processos, quando ligados em redes, podem trocar uma variedade de informações relacionadas com a procura, inventariar a

existência de determinada matéria-prima, avaliar a capacidade produtiva e de logística de um determinado setor e previsão em tempo real de alterações ou ruturas. A tecnologia necessária para tornar possível este quadro apoia-se em sistemas integrados de planeamento de produção, autonomia logística, análise avançada. A integração dos dados em tempo real na cadeia de fornecimento permite reduzir significativamente os prazos de entrega tendo influência direta nas necessidades de armazenamento e nos stocks de matéria-prima[70].

4 Casos de Estudo

Tendo em conta as vantagens associadas a este tipo de evolução ao nível das tecnologias de produção, já existem alguns produtos comerciais disponíveis no mercado, com base neste tipo de fabrico. Assim, neste capítulo, serão enunciados três diferentes produtos fabricados a partir da técnica de manufatura aditiva. Os produtos em questão pertencem a indústrias diferentes, portanto simbolizam exemplos práticos da aplicação desta tecnologia.

4.1 Sapatilhas Futurecrafh 4D – Adidas – Equipamentos desportivos

Este caso de estudo, corresponde ao desenvolvimento de uma sapatilha desportiva com o nome comercial *Futurecrafh* 4D para a marca Adidas. Este produto é pioneiro da marca, uma vez que é o primeiro processo de produção em massa de solas com geometria complexa, impossíveis de serem fabricados por tecnologias convencionais. Assim sendo, a sua produção é feita em parceria com a empresa do Vale Silício, Carbon cujo propósito é originar produtos com produção em escala através do processo de manufatura aditiva[71].

A tecnologia aplicada a este desenvolvimento é designada CLIP, DLS – Digital Light Synthesis, que utiliza projeção de luz digital, ótica permeável por oxigénio e resina líquida programável com o intuito de produzir componentes finais com boas propriedades mecânicas e um acabamento de excelência. No meio dos benefícios, destaca-se as propriedades mecânicas das partes produzidas por esta tecnologia que são as mesmas independentemente da direção em que o material é impresso. O CLIP é um processo fotoquímico que utiliza luz e oxigénio para produzir partes através da adição de camadas[71].

O material utilizado é desenvolvido pela *Carbon* e é designado de EPU, é uma resina de Poliuretano, um elastómero. Esse é altamente elástico, resistente à rotura e resiliente. É de ressaltar, que tem o comportamento semelhante a elastómeros de poliuretano modificados por moldação por injeção com comportamento elástico que compreende um amplo intervalo de temperaturas. As suas propriedades mecânicas e de tensão são exibidas na tabela seguinte[72].

Propriedades de Tração (Método ASTM D412, Die-C, 500mm/min)	
Limite de Resistência a Tração	10.2 ± 1.6 MPa
Alongamento na fratura	310 ±25%
Alongamento Final (100% Elongation)	2,1%
Tensão a 50% de deformação	1,9 MPa
Tensão a 100% deformação	3,0 MPa
Tensão a 200% deformação	5,5 MPa
Outras Propriedades Mecânicas	
Resistência ao Rasgo, ASTM D624-C	23± 3 kN/m
Compression Set, 23°C, 72 h, ASTM D395-B	23%
Resiliência Bayshore, ASTM D2632	29%

Propriedades Térmicas	
Coefficiente de expansão térmica ASTM D696	190 ppm/ °C
T _g (Temperatura de Transição Vítrea DMA, E)	-50 °C
T _g (DMA, tan(d))	-6 °C

Tabela 3: Propriedades Mecânicas e Térmicas do EPU fabricado pela Carbon[72].

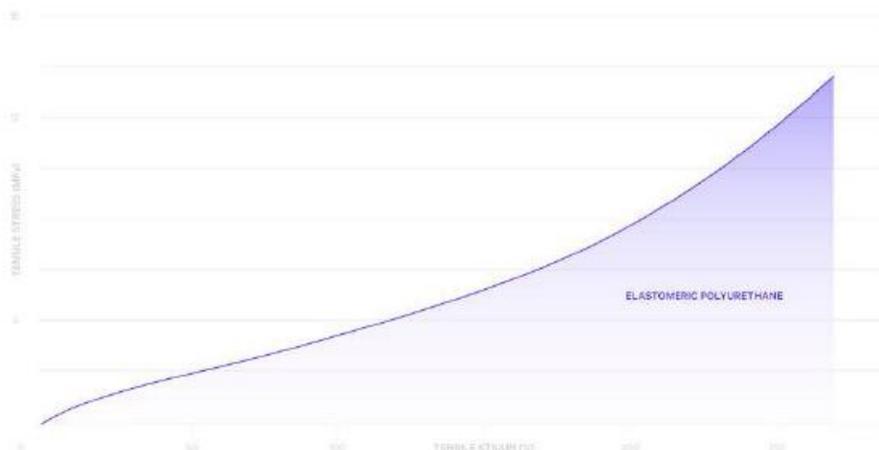


Figura 24: Gráfico de tensão versus deformação do EPU[72].

Assim sendo, o novo calçado disponibilizado pela Adidas agrega a inovação da Manufatura Aditiva a elevada performance, originando uma entressola do calçado que varia as suas propriedades ao longo do mesmo. É de notar que isto não é possível em métodos de fabrico de moldação por compressão ou injeção numa só peça, para atingir alta performance é necessário trabalho intenso para construção em múltiplas partes. Contudo, a tecnologia de impressão 3D da *Carbon* tornou-se uma alternativa inteligente uma vez que permitiu a impressão de 50 entressolas diferentes chegar ao produto final. Além disso a sua rapidez permite que este tipo

de tecnologia deixe de ser utilizada apenas para protótipos e seja adotada em produções de larga escala[73].



Figura 25: Adidas *Futurecraft* 4D[73].

4.2 Sondas para Medição do Fluxo de Ar – Vectoflow – Aviação

Um dos exemplos de sucesso de produtos desenvolvidos com esta tecnologia é o das sondas com capacidade de medir o fluxo de ar, esta medição é realizada através do ângulo de ataque e da velocidade. As mesmas são fabricadas pela empresa alemã Vectoflow que atua no ramo de metrologia fluido dinâmica de alta precisão[74].

As suas principais aplicações são em aeronaves e nos designs de turbo para máquinas. A empresa Vectoflow utiliza a tecnologia de Powder Bed Fusion da líder de mercado EOS. A mesma também é designada de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) e utiliza laser como energia para fundir o material metálico[74].

No meio destas sondas pode se destacar as do tipo Kiel que medem a pressão total do fluxo e revelam-se por ser extremamente rígidas e duráveis. Atualmente, são fabricadas numa só peça utilizando a técnica de impressão 3D de metais. Os possíveis materiais utilizados para a sua fabricação são titânio, aço inoxidável, aço inoxidável de alta temperatura e Inconel (liga níquel-cromo)[75].



Figura 26: Sonda de Kiel produzida pela Vectroflow[75].



Figura 27: Tubos de Kiel produzidos pela Vectroflow[75].

Tabela 4: Especificações da sonda de Kiel produzida pela Vectroflow[75].

Comprimentos	280 mm ou outros comprimentos possíveis
Diâmetro	Depende do design
Material	Titânio, Aço Inoxidável, Aço inoxidável de alta temperatura e Inconel
Instalação	Customizável pelo cliente
Conexões	Customizável pelo cliente
Alcance do ângulo/ alcance da temperatura com menos de 1° de desvio da medida total da temperatura vs temperatura real	±60°
Alcance da velocidade	Até 2 Mach
Alcance da temperatura	Até 1000°

Assim sendo, os materiais utilizados para o desenvolvimento desta peça são resistentes a altas temperaturas e velocidades, requisitos fundamentais para que as suas funcionalidades sejam cumpridas. É fundamental que esta seja extremamente resistente à pressão[74].

Um dos fatores determinantes para componentes de aeronaves é que estas suportem velocidades muito elevadas, pois é uma vantagem competitiva em relação a outros meios de

transporte. Porém, é também um fator crítico, levando em consideração que quando a velocidade é muito baixa pode resultar em colapso. Entretanto altas velocidade criam situações de altas pressões para os seus componentes. Assim sendo, as sondas metrológicas são importantes para medir velocidades relevantes. A velocidade é determinada baseada na pressão do fluxo de ar que passa por estas sondas[74].

A funcionalidade das sondas de Kiel é levada ao extremo em processo de manobras ou nas aterragens onde o fluxo de ar está localizado a um ângulo característico. Uma vez que, estes medidores se encontram localizados no motor, nesse momento estes sofrem maiores cargas térmicas do que o normal, criando desafios para os engenheiros, que foram obrigados a produzir um grupo de sondas preparadas para enfrentar essas condições. Com base nisto, foram desenvolvidas com um design aerodinâmico especial, com forma reduzida e otimizada para não prejudicar o fluxo de ar, suportando uma temperatura até 100°C[75].

Antes da Vectoflow aparecer no mercado com a tecnologia de manufatura aditiva, as sondas metrológicas eram produzidas em várias partes, tornando-as instáveis. Por outro lado, atualmente estas são produzidas através de DMSL numa parte única e de tamanho reduzido com uma arquitetura que só é possível com a utilização desta tecnologia. Outro fator levado em consideração na conceção destas peças foi o desenvolvimento de mecanismos que pudesse evitar um barulho secundário indesejado, a solução encontrada para colmatar este problema foi com adição de camadas[74].

Uma das vantagens apontadas à produção por manufatura aditiva para as sondas da Vectoflow é que estas são 150% mais rígidas que as convencionais. Por outro lado, apresentam espessura extremamente fina, melhor *design* aerodinâmico e acabamento, obtendo medições precisas. Assim sendo, o componente anterior apresentava vários casos de fratura. O novo produto apresenta maiores intervalos de manutenção, o que dependendo do local onde o componente é instalado pode reduzir dias de pausa para manutenção, aumentando a sua vida útil. Este fator tem um efeito nos custos refletindo também na robustez e na maior segurança[74].

Em conclusão, a manufatura aditiva permitiu uma maior flexibilidade no *design* material e tamanho, maior agilidade na produção e menor tempo para a entrega do produto final. Assim sendo, consegue-se obter um produto final com um tempo de vida útil superior, de alta segurança e resistente a pressões[74].

4.3 Plataformas Esterotáxicas para Neurocirurgias – FHC - Medicina

No setor da saúde a manufatura aditiva não representa apenas uma opção a processos já utilizados, mas sim a solução para um elevado número de casos que antes não teriam qualquer tipo de solução viável. As suas aplicações vão desde implantes e aparelhos cirúrgicos até à impressão do tecido humano. O último produto a ser estudado nesta seção é a *microTargettingtm Platform*, caracteriza-se por ser uma plataforma Estereotáxica para neurocirurgias produzidos pela empresa FHC, empresa líder em inovação de neurociência nos últimos 40 anos. Utilizada em cirurgias de Estimulação Cerebral Profunda (DBS - Deep Brain Stimulation) para tratar essencialmente pacientes com as seguintes patologias: Parkinson, distonia e tremor essencial. A geometria do cérebro de cada pessoa é única e por isso cada produto deve ser customizado, característica que se torna possível alcançar, através da utilização da tecnologia de adição de camadas[76].

O modelo desenvolvido pela FHC em parceria com um neurocirurgião, utiliza a impressão 3D que se fundamenta nas coordenadas anatómicas de cada paciente. A primeira aplicação desta tecnologia denominada STarFix é uma plataforma Estereotáxica, que promove ao paciente conforto, alta precisão e redução significativa do tempo na sala de cirurgia[76].

O processo utilizado para a sua produção é o de Sinterização a Laser (SLS - *Selective Laser Sintering*) já citado e devidamente explorado anteriormente neste relatório. O seu princípio de funcionamento baseia-se na utilização de um laser de CO2 utilizado para digitalizar o polímero e fundir duas partículas formando um modelo a partir da sua solidificação. A máquina utilizada é a FORMIGA P 100 da empresa EOS.

No que diz respeito, à matéria prima utilizada para a produção das plataformas Estereotáxicas da FHC, Figuras 28 e 29, é o polímero *PA 2201 Polyamide Powder* e as respetivas propriedades estão expostas na Tabela 5. Este material apresenta alta rigidez e resistência mecânica, além do comportamento constante e de excelência a longo prazo, alta resolução de detalhes e variedade de acabamentos [76][74].

Tabela 5: Propriedades Mecânicas do PA 2201[74]

Propriedade	Moldagem & Extrusão	Produzido por SLS (EOS)
Módulo de Elasticidade		
Direção X (MPa)	248-1242	1700
Direção Y (MPa)	248-1242	1700
Limite de resistência a Tração		
Direção X (MPa)	21-69	48
Direção Y (MPa)	21-69	48
Alongamento		
Direção X (%)	250-390	15
Módulo de Flexão		
Direção X (MPa)	186-1311	1500
Resistência à Flexão		
Direção X (MPa)	10-56	58
Impacto Charpy (kJ/m² @ 23°C)	N/A	53
Impacto Charpy com Entalhe (kJ/m² @ 23°C)	N/A	4.8



Figura 28: Plataforma Estereotáxica produzida pela FHC[76].

A cada ano aproximadamente 8000 cirurgias de DBS são realizadas. As plataformas utilizadas tradicionalmente nessas cirurgias apresentavam algumas limitações aos pacientes. Por exemplo, para prevenir o movimento durante a cirurgia, elas permitiam imobilizar a cabeça dos pacientes para obter imagens, identificar a localização correta da cirurgia e ainda permitiam a implantação de eléctrodos no tecido cerebral[76].

As novas plataformas permitem que o paciente tenha um maior conforto na cirurgia, cuja duração da mesma foi reduzida de 12 horas para 2 horas no total. As novas plataformas produzidas com as máquinas da EOS permitem um menor prazo de entrega de produtos flexíveis e customizados para cada doente e com menores custos de produção. A nova máquina é ainda mais precisa e apresenta mais funcionalidades. Um exemplo de funcionalidade que foi

incorporada na plataforma Estereotóxica é o anel metálico de indexação, antes este componente era anexado pelo cirurgião á plataforma durante a cirurgia. Hoje em dia, este componente encontra-se incorporado ao aparelho, resultando numa redução de tarefas e de tempo na sala de cirurgia[76].

A FORMIGA P 100, Figura 30, também é vantajosa para a FHC pelo fato de todo o material fornecido a ela para a fabricação da peça ser utilizado, gerando uma economia e vantagem ambiental de não desperdiçar matéria prima[76].



Figura 29: Vistas da Plataforma Estereotóxica produzida pela FHC[76].



Figura 30: Máquina FORMIGA P 100 da EOS[76].

5 Oportunidades da Tecnologia para o Projeto – Análise SWOT

Em forma de conclusão e para se avaliar o posicionamento global da Tecnologia referida para o projeto, em todas as suas vertentes, apresenta-se uma análise SWOT. Assim sendo, a Análise SWOT é uma ferramenta de gestão muito utilizada pelas empresas para o diagnóstico estratégico. Neste caso, será utilizado para avaliar o posicionamento da Manufatura aditiva tendo por base todos os aspetos já referidos ao longo do relatório.

O termo SWOT é composto pelas iniciais das palavras Strengths (Forças), Weaknesses (Fraquezas), Opportunities (Oportunidades) e Threats (Ameaças). Uma ‘Força’ é algo que tem um impacto positivo ou que de alguma forma ofereça vantagem competitiva ou valor. Por outro lado, a ‘Fraqueza’ é algo prejudicial ao crescimento, que elimina as vantagens competitivas resultantes das ‘Forças’, sendo que ambas resultam de uma análise das características intrínsecas (internas) da tecnologia. Relativamente à análise externa, ou seja, os fatores capazes de influenciar positiva ou negativamente as ‘Forças’ e ‘Fraquezas’ da tecnologia, existem as ‘Oportunidades’ que podem surgir de variados motivos e resultantes do mercado, alterações tecnológicas, entre outras. Isto é, oportunidades que podem resultar em crescimento a partir do momento em que esse ponto é desenvolvido. Por outro lado, ‘Ameaças’ é algo que poderá trazer risco para o elemento em análise, neste caso a tecnologia a adotar e que de alguma forma estará fora do controlo interno. Desta forma, os objetivos deverão ser:

- Fortalecer as oportunidades para ganhar vantagem competitiva;
- Converter ameaças ou fraquezas em oportunidades ou forças.

Tabela 6: Análise SWOT sobre o posicionamento da tecnologia para o Projeto

Ambiente Interno		Ambiente Externo	
Fraquezas	<ul style="list-style-type: none"> • Preço dos equipamentos; • Custo elevado de manutenção dos equipamentos; • Limitações de escala: necessidade de aumento da velocidade de produção para aumento da competitividade para grandes volumes de produção; • Limitações na utilização de multimaterial e em alguns materiais; • Dificuldade na utilização de materiais recicláveis; • Falhas de qualidade nos acabamentos do produto final; • Necessidade de acabamento do produto após impressão. 	Ameaças	<ul style="list-style-type: none"> • Desconhecimento dos designers e produtores sobre as vantagens específicas da tecnologia; • Dificuldade em reunir um conjunto de especialistas e contribuidores para o desenvolvimento e maturação da tecnologia; • Diminuição das necessidades globais de mão-de-obra; • Necessidade de mão-de-obra especializada e com conhecimento apropriado; • Problemas ao nível da certificação e proteção de dados; • Falta de aplicabilidade para determinados setores de atividade; • Perturbação de setores industriais estáveis.

Ambiente Interno		Ambiente Externo	
Forças	<ul style="list-style-type: none"> • Permite o rápido e ágil desenvolvimento do produto (prototipagem); • Descrição prévia do produto antes do fabrico (prototipagem); • Detecção de falhas aquando a produção definitiva (prototipagem); • Diminuição dos custos associados à complexidade do produto; • Visualização do produto antes do fabrico final; • Eliminação dos custos com ferramentas; • Uso eficiente de materiais através da redução de quantidade de material desperdiçado; • Redução da quantidade de processos de montagem; • Elevada customização dos produtos aumentando a flexibilidade das linhas produtivas; • Produção 'on demand', eliminando as necessidades de stocks; • Redução das emissões de carbono obtidas à custa da redução no transporte de materiais; • Redução das emissões de carbono obtidas à custa do consumo energético necessário durante todo o ciclo de vida (não apenas na produção); • Gastos energéticos por unidade de tempo menores relativamente aos processos tradicionais; • Minimiza a utilização de químicos; • Evita a exposição a longo prazo a ruídos e gases dos processos tradicionais de produção; • Fabrico de peças mais leves e de fácil transporte; • Menores necessidades de plásticos e embalagens; • Descentralização da produção com impacto na necessidade de transporte; • Produção mais próxima do consumidor final; • Possibilidade de fabrico de peça específica que garanta o reuso de produtos já existentes; • Maior funcionalidade do produto final; • Competitivo para um volume elevado de produção mista; • Fácil partilha de produtos através da <i>Internet</i>. 	Oportunidades	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da eficiência (velocidade de processamento) com impacto na redução dos consumos energéticos; • Garantia de reutilização e reciclagem dos produtos em fim de vida; • Possibilidade de design dos produtos de forma compatível com o ambiente; • Facilidade na gestão da incerteza da procura; • Criação de uma nova indústria especializada no design de produtos com mão-de-obra específica; • Criação de novos tipos de postos de trabalho: de design e de manuseamento da tecnologia; • Transações de design em vez de produtos; • Criação de uma nova indústria de produção e de materiais necessários à produção; • Relevante para fins de pesquisa e ensino; • Envolvimento das universidades no desenvolvimento da tecnologia; • Democratização da produção, permitindo o acesso de zonas remotas a bens de difícil acesso; • Eliminação da dependência dos países menos desenvolvidos dos mais desenvolvidos.

6 Conclusões

A manufatura aditiva é um método de produção cujo princípio é a adição de material camada por camada. Surgiu na década de 80 com o intuito de fabricar protótipos, mas até há alguns anos não era possível imaginar que poderia ser implementada como um processo de produção em escala. As suas aplicações atuais transcendem indústrias e criam oportunidades para novos produtos de *design* complexo e disruptivo.

A Manufatura Aditiva deve ser considerada uma realidade para as organizações. A tecnologia que era vista como algo distante para a aplicação nos sistemas produtivos, hoje é algo presente em organizações com resultados satisfatórios, mesmo que dependente direto do tipo de produção da empresa.

Ao identificar os impactos da inovação ao nível das tecnologias nos sistemas produtivos e as suas repercussões para a competitividade das empresas, foi confirmado o objetivo geral da realização deste Benchmark. Para sintetizar as análises realizadas, destaca-se que a introdução e desenvolvimento da Manufatura Aditiva pode ser considerada um diferencial competitivo para as empresas. Para os processos de desenvolvimento de produtos e para manufatura de alta variedade e baixos volumes é considerada uma realidade. Assim que as limitações relacionadas à velocidade de impressão forem resolvidas, será viável para um conjunto ainda maior de empresas. Estas alterações nos sistemas produtivos repercutem na competitividade das empresas, apresentando redução de custos, garantindo um melhor desempenho de entrega, mais flexibilidade e sustentabilidade. Além disso, por meio da análise de conteúdo da literatura e das perceções dos especialistas, foram avaliados criticamente estes impactos e repercussões. Uma análise integrada identificou como cada elemento do sistema produtivo impacta em cada critério competitivo.

Sendo assim, para que a Manufatura Aditiva faça parte dessa realidade, as organizações devem pensá-la de maneira sistémica, ampla, avaliando todos os benefícios que podem ser alcançados a partir da sua utilização e da sua prática. Neste sentido, as empresas não devem pensar apenas na troca do equipamento, per se. Ao avaliar a viabilidade da Manufatura Aditiva, as empresas devem pensar nos impactos positivos em termos de redução de stocks, esperas e a consequente redução do lead time de produção.

Por outro lado, devem ser consideradas as oportunidades dos novos modelos de negócio. Assim sendo, a introdução de novas tecnologias de produção vão permitir negócios até hoje não considerados e alterar a forma de comercialização e distribuição dos produtos. Os centros de distribuição, por sua vez, podem se transformar em hubs de impressão, ocupando áreas menores e produzindo de acordo com a demanda. Ainda, devido ao fato de necessitar apenas do projeto do produto, digital, a Manufatura Aditiva vai permitir a comercialização apenas do desenho, sendo este produzido próximo ou no local de consumo do cliente final, eliminando, em parte ou até mesmo por completo, a necessidade do transporte do produto físico. Estes novos modelos de negócio dependem ainda de legislação para garantir a segurança da informação e propriedade intelectual destes projetos virtuais, porém não se apresentam como algo distante, podendo significar repercussões positivas para as organizações numa perspetiva a curto prazo.

Nessa perspetiva, com a utilização da Manufatura Aditiva, a tendência é que os negócios passem a ser mais B2C do que B2B. Desta forma, prevê-se que elos da cadeia poderão ser eliminados ou reduzidos. Estas alterações dos modelos de negócio podem tornar as empresas mais ágeis, ampliar o seu raio de atuação e mercado, além de reduzir custos.

No entanto, nem todos os benefícios da Manufatura Aditiva serão adquiridos no futuro. A Manufatura Aditiva possibilita fabricar aquilo que a criatividade permite. Essa liberdade geométrica comporta, além de desenvolver novos produtos, redesenhar produtos existentes, reestruturando a sua forma, reduzindo o peso final do produto e proporcionando maior agregação de valor. Sendo assim, a Manufatura Aditiva utilizada para o desenvolvimento de produto traz evidentes ganhos em termos de prazo e custo. Contudo e em conformidade com exemplos reais, que comprovam a eficácia em termos de redução do lead time de desenvolvimento, podendo atingir até 70% e ao nível da redução de custos podem atingir uma relação 1/10 do valor gasto para o desenvolvimento pelo processo tradicional de manufatura.

Sendo assim, resta evidente que, quanto mais a empresa se aproximar de uma produção caracterizada por alta variedade de produtos e baixo volume de produção, maiores serão as repercussões positivas a partir do uso da Manufatura Aditiva.

Os produtos fabricados atualmente em sistemas de produção tradicionais, passam por um conjunto de operações até que se transformem em produto final. Com a prática deste tipo de

processos produtivos, esse conjunto de operações será reduzido, em alguns casos até para operações únicas, visto que uma impressora 3D fabricará produtos ou peças desde a matéria-prima até à fase final de processamento. Cabe destacar que esta visão corrobora com os princípios do Sistema Toyota de Produção. É possível identificar as características intrínsecas associadas ao Sistema Toyota de Produção, nomeadamente, este procura de forma contínua a otimizar os recursos da organização, por meio da identificação e eliminação dos desperdícios. A partir da análise realizada neste estudo, conclui-se que a Manufatura Aditiva potencializa esta redução de desperdícios, promovendo a redução de perdas produtivas como stocks, transporte, espera e fluxo, por exemplo. Este ponto apenas converge com a visão de que a Manufatura Aditiva será uma tecnologia complementar aos processos de fabricação tradicionais, aumentando os resultados dos sistemas produtivos das organizações.

De forma a concluir, sob o ponto de vista dos critérios competitivos, cabe ressaltar que, de uma forma geral, estes são beneficiados pela utilização da Manufatura Aditiva nos sistemas produtivos. Torna-se evidente que os critérios competitivos, como é o caso de exemplo: desempenho de entrega, flexibilidade, velocidade, inovação e sustentabilidade são incrementados pelo uso da Manufatura Aditiva. Do ponto de vista do critério qualidade, avanços tecnológicos precisam ser realizados para que operações complementares deixem de ser necessárias. No que diz respeito ao custo, para produção em baixo volume e alta variedade, os benefícios da Manufatura Aditiva são visualizados na prática, porém para a produção em grande escala, o elevado tempo de ciclo é uma variável limitativa.

7 Bibliografia

- [1] J. KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, “Recommendations for implementing the strategic initiative industrie 4.0: final report of the industrie 4.0,” Frankfurt, Alemanha, 2013.
- [2] A. BHATTACHERJEE, “Social science research: principles, methods, and practices.,” Flórida, 2012.
- [3] THE BOSTON CONSULTING GROUP (BCG), “Industry 4.0: the future of productivity and growth in manufacturing industries.,” 2015.
- [4] BITKOM; VDMA; ZVI, “Implementation strategy industrie 4.0: report on the results of the industrie 4.0 platform,” Alemanha, 2016.
- [5] B. BAUERNHANSL, T.; TEN HOMPEL, M.; VOGEL-HEUSE, “Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik- Anwendung, Technologien und Migration.,” Alemanha: Springer Vieweg, 2014.
- [6] B. A. FOROUZAN, “Comunicação de Dados e Redes de Computadores,” M. Hill, Ed. 2008, pp. 1168–1170.
- [7] R. KIRNER, C.; TORI, “Fundamentos de Realidade Aumentada,” C. K. RomeroTori; and R. S. (Ed.), Eds. 2006.
- [8] E. Mark Cotteleer, Stuart Trouton, & Dobner, “3D opportunity and the digital thread,” 2016. .
- [9] N. W. Jovanovic, V., & Hartman, “Web-based virtual learning for digital manufacturing fundamentals for automotive workforce training,” *Int. J. Contin. Eng. Educ. Life Long Learn.*, pp. 300–310, 2013.
- [10] Comissão Europeia, “Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: The European Agenda on Security”, 2015.
- [11] World Economic Forum e The Boston Consulting Group, “Cyber Resilience Playbook for PublicPrivate Collaboration’.,” 2018.
- [12] M. Besanko, D., Dranove, D., Schaefer, S., e Shanley, “Economics of Strategy,” Nova Iorque: Wiley., 2012.
- [13] Correia, A. B., Deus, P., e Baptista, J. R., “Indústria 4.0: Construir a empresa digital,” 2016.
- [14] Deloitte., “Indústria 4.0.” .
- [15] Banco de Portugal., “Boletim Económico Junho 2017,” 2017. [Online]. Available: https://www.bportugal.pt/sites/default/files/anexos/pdfboletim/bol_econ_junho17_p.pdf, a.
- [16] D. H. Autor, “Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation,” *J. Econ. Perspect.*, 2015.
- [17] D. Autor, D. H., e Dorn, “The Growth of Low-Skill Service Jobs and the Polarization of the US Labor Market,” *A. E. Review*, Ed. 2013.
- [18] M. G. K. Sobolev, *How Nanotechnology Can Change the Concrete World*, Part 2. 2005.
- [19] S. C. Fonseca, T., Lima, F., e Pereira, “Job polarization, technological change and routinization: Evidence for Portugal,” *Labour Economics*, Ed. 2018, pp. 317–339.
- [20] M. Borland, J., e Coelli, “Are Robots Taking Our Jobs?,” 2017, pp. 377–397.
- [21] CGI., “Industry 4.0: Making your business more competitive,” 2017. [Online]. Available: https://www.cgi.com/sites/default/files/white-papers/manufacturing_industry-4_white-paper.pdf.
- [22] American Society for Testing and Materials., “Standard Terminology for Additive

Manufacturing Technologies,” 2015. [Online]. Available: <http://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>.

- [23] A. S. R. K. Chen, Y. Jin, J. Wensman, “Additive manufacturing of custom orthoses and prostheses - A review,” in *Additive Manufacturing*, 2016, pp. 77–89.
- [24] T. Wohlers and T. Caffrey, “Wohlers Report 2016. 3D printing and Additive Manufacturing. State of the industry,” 2016.
- [25] European Commission, “Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing,” 2014.
- [26] J. S. et Al, “Additive Manufacturing: Status and Opportunities,” 2012.
- [27] Gart. Inc., “Hype Cycle for 3D Printing,” 2014.
- [28] T. R. Q. Shi, D. Gu, M. Xia, S. Cao, “Effects of laser processing parameters on thermal behavior and melting/solidification mechanism during selective laser melting of TiC/Inconel 718 composites,” 2016.
- [29] and W. M. Y. Cadoret, V. Chastand, A. Tezenas, “Additive Manufacturing in Thales,” Paris, 2015.
- [30] D. Bak, “Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter,” 2003.
- [31] D. Graça, “Fabrico e Pós-Processamento de Peças Obtidas por TDP,” 2012.
- [32] P. Yan, X. e Gu, “A review of rapid prototyping technologies and systems. Computer-Aided Design,” 1996.
- [33] ARTIS, “Tecnologias de prototipagem - estereolitografia SLA. Clínica de Odontologia Integrada Artis, Brasília/DF,” 2011.
- [34] Carbon3D, “Carbon3D, Inc.” [Online]. Available: <http://carbon3d.com/>.
- [35] A. R. J. J. R. Tumbleston, D. Shirvanyants, N. Ermoshkin, R. Januszewicz, J. D. Kelly, K. Chen, R. Pinschmidt, J. P. Rolland, A. Ermoshkin, E. T. Samulski, and M. DeSimone, “Continuous liquid interface production of 3D objects,”
- [36] A. H. K. V. Wong, “A Review of Additive Manufacturing,” 2012.
- [37] F. A. C. Alves., “Análise e Otimização do Processo Fused Filament Fabrication,” Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, 2014.
- [38] SpaceX., “SpaceX launches 3D-printed part to space, creates printed engine chamber.” [Online]. Available: <http://www.spacex.com/news/2014/07/31/spacex-launches-3d-printed-part-spacecreates-%0Aprinted-engine-chamber-crewed>.
- [39] B. Krassenstein., “20,000 3D Printed Parts Are Currently Used on Boeing Aircraft as Patent Filing Reveals Further Plans.” [Online]. Available: <https://3dprint.com/49489/boeing-3d-print/>.
- [40] Y. S. Dambatta, A. A. D. Sarhan, “Surface Roughness Analysis, Modelling and Prediction in Fused Deposition Modelling Additive Manufacturing Technology,” 2016.
- [41] A. P. S. Dul, L. Fambri, “Fused deposition modelling with ABS-graphene nanocomposites,” in *Composites: Part A*, 2016, pp. 181–191.
- [42] N. Lievendag, “3D Printing Filament Guide: ABS vs PLA vs many materials.” [Online]. Available: <http://nicklievendag.com/filament-guide/>.
- [43] Stratatsys., “Stratatsys 3D Printing Keeps NASA Satellite On Time and On Budget - FDM Strong Enough for Space.” [Online]. Available: <http://blog.stratatsys.com/2015/02/12/nasa-3d-printing-fortus/>.
- [44] J. Cesarano III, “A review of robocasting technology,” in *Solid Freeform and Additive Fabrication a Materials*, 1999, pp. 133–139.

- [45] J. Lewis, J. Smay, J. Stuecker, J. Cesarano III, "Direct Ink Writing of Three- Dimensional Ceramic Structures," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 3599–3610, 2006.
- [46] S. K. and S. R. Schmid, "Chapter 10: Polymer Properties," in *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Fifth Edit., Perason Education, 2008.
- [47] L. C., "Manual de Polímeros e Materiais Poliméricos."
- [48] L. Marques, "O que são polímeros e porque são interessantes?"
- [49] G. Botelho, "Química, Degradação e Reciclagem de Polímeros," 2011.
- [50] and D. R. M. Milanese, H. Jacobus, C. Voorwald, "Vegetal fibers in polymeric composites : a review," in *Polimeros*, 2015, pp. 9–22.
- [51] "Visão Geral sobre Polimeros Biodegradaveis," 2013.
- [52] B. F. M. de Castro, "Estudo e Caracterização Mecânica de Compósitos Reforçados com Fibras Naturais," 2013.
- [53] B. F. M. Castro, "Estudo e Caraterização Mecanica de Compósitos reforçado com fibras naturais," 2013.
- [54] R. BRENTALL, "Rapid Manufacturing."
- [55] B. MESKO, "12 Things We Can 3D Print in Medicine Right Now."
- [56] A. MURPHY, Sean; ATALA, "3D Bioprinting of tissues and organs."
- [57] BROOKS. Katherine, "14 Ways 3D Printing Has Changed The Art World."
- [58] M. STARR, "Gravity Defying 3D Printer to print bridge over water in Amsterdam."
- [59] M. Bridge., "MX3D."
- [60] N. HALL, "Top 10 3D printed construction innovations."
- [61] R. BRENTALL, "Rapid Manufacturing."
- [62] S. P. and T. Adeyemi, Olutobi, Ivan Grove Norton, "Advanced Monitoring and Management Systems for Improving Sustainability in Precision Irrigation," 2017.
- [63] C. BENNET, "The Future of 3D Printing on the Farm."
- [64] 2016. Amaral, L. M., "O conceito de reindustrialização, Industria 4.0 e a politiac industrial para o século XXI."
- [65] L. M. Amaral, "Política Industrial para o séc XXI," Aveiro, 2016.
- [66] 20145. Gloy, Y.-S., "Industry 4.0- The future of textile Manufacturing."
- [67] Mckinsey&Company, "How to navigate digitalization of the manufacturing sector.," 2015.
- [68] Robson, C., "Real World Research:a resource for social scientists and practitionerresearchers," 2002.
- [69] Schrauf, S. & Berttram, P., "How digitalization makes the supply chain more efficient, agile,and customers -focused.," Munich: PwC, 2016.
- [70] G. Stock, T. & Seliger, "Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0," 2016.
- [71] Carbon3D, "Our Technology." [Online]. Available: <https://www.carbon3d.com/our-technology/>.
- [72] Carbon3D, "EPU: Elastomeric Polyurethane." [Online]. Available: <https://www.carbon3d.com/materials/e-pu-elastomeric-polyurethane/>.
- [73] Carbon3D, "The perfect fit: Carbon + adidas collaborate to upend athletic footwear." [Online]. Available: <https://www.carbon3d.com/case-studies/adidas/%0D>.
- [74] "Material Properties." [Online]. Available: http://www.efunda.com/materials/polymers/properties/polymer_datasheet.cfm?M.
- [75] vectoflow, "vectoflow - measurements in fluids." [Online]. Available: <https://www.vectoflow.de/en/products/kiel-probes/>.

- [76] EOS, "Medical: FHC - EOS Technology for Manufacturing of Stereotactic Platforms for Neurosurgery." [Online]. Available: https://www.eos.info/press/customer_case_studies/fhc.