



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Perspetivas de adoção da fabricação aditiva no setor industrial português

(Versão final após defesa)

André Pedro Meireles Xavier de Freitas Coelho

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de estudos integrado)

Orientador: Prof. Doutor José Manuel Mota Lourenço da Saúde

Covilhã, novembro de 2017

Dedicatória

Dedico esta dissertação a toda a minha família, namorada e amigos.

Agradecimentos

Um especial agradecimento a todos os que contribuíram para a realização desta dissertação nomeadamente ao meu orientador Professor Doutor José Manuel Mota Lourenço da Saúde, que esteve sempre presente para desenvolver novas ideias, bem como ao CEiiA pela oportunidade de compreender o panorama atual da fabricação aditiva. Agradeço também aos meus amigos, família e namorada pelo apoio constante e palavras de motivação desde o início deste trabalho.

Resumo

O desenvolvimento tecnológico e a aposta nos projetos de I&D são dois fatores importantes para o crescimento das mais diversas indústrias. A fabricação aditiva é mais uma das tecnologias atuais que são vistas com um enorme potencial futuro, podendo vir a alterar as cadeias de produção. Trata-se de uma tecnologia já existente há mais de 30 anos que utiliza processos de fabrico inovadores, com certas vantagens e desvantagens face aos métodos de fabricação tradicionais utilizados.

A fabricação aditiva é atualmente uma tecnologia que se desenvolve constantemente ano após ano e com previsões de crescimento bastante consideráveis no futuro.

Nesta dissertação são apresentados não só os processos que constituem a fabricação aditiva mas também os fatores que a tornam numa tecnologia com tanto potencial. Um estudo do setor aeronáutico nacional e do estado atual da tecnologia em Portugal realizou-se de modo a ser possível constituírem-se alternativas para que as empresas portuguesas assumam a fabricação aditiva como uma opção viável, que corresponde ao objetivo desta dissertação.

Através da comparação de estudos já realizados, um ao mercado nacional e outro ao mercado internacional, tiraram-se diversas conclusões relativas ao grau de utilização da fabricação aditiva em Portugal e sobre o que é necessário fazer para que esta cresça nos próximos anos.

Palavras-chave

Fabricação Aditiva, Impressão 3D, CAD, Componente

Abstract

The technological development and the increased investment on R&D projects are two main factors that influence the continuous growth of the industrial sector. Nowadays Additive Manufacturing is one of these full of potential technologies that can be considered a possible game changer in the future of production chains.

Being a technology that is around for more than 30 years and by having innovative production processes the technology has a lot of advantages when compared to the traditional manufacturing processes. Additive Manufacturing is growing year after year and is predicted to continue growing even more in the future.

In this dissertation it is presented the main production processes and advantages of AM and the reason why it has such a big potential. An outlook of the aerospace industry in Portugal and the actual state of the technology by the companies in the country are considered very important in order to present reasons about why Additive Manufacturing should be considered an option. This is the main goal of this dissertation.

After the comparison between two previously made studies about the usage of Additive Manufacturing in Portugal and overseas it was possible to show the main aspects that should be considered in order to obtain a technological growth of the technology during the following years.

Keywords

Additive Manufacturing, 3D Printing, CAD, Component

Índice

1- Introdução.....	1
1.1 Objetivo da dissertação	1
1.2 Limites do trabalho.....	2
1.2 Metodologia utilizada	2
1.3 Estrutura do trabalho	2
2- Estado de arte	5
2.1 Generalidades	5
2.2 Processos de fabricação tradicional vs fabricação aditiva.....	6
2.2.1 Processos de fabricação tradicional.....	6
2.2.2 Vantagens dos processos de fabricação aditiva.....	10
2.2.3 Vantagens dos processos de fabricação tradicionais	10
2.3 Aplicações da Fabricação Aditiva	14
2.3.1 Indústria Médica	15
2.3.2 Indústria Automóvel.....	16
2.3.3 Indústria Aeroespacial	18
3- Processos produtivos em FA	21
3.1 <i>Vat Photopolymerization</i>	21
3.2 <i>Material Jetting</i>	23
3.3 <i>Binder Jetting</i>	25
3.4 <i>Material Extrusion</i>	27
3.5 <i>Powder Bed Fusion</i>	28
3.5.1 <i>Selective Laser Sintering (SLS)</i>	29
3.5.2 <i>Selective Laser Melting (SLM)</i>	30
3.5.3 <i>Selective Heat Sintering (SHS)</i>	31
3.5.4 <i>Direct Metal Laser Sintering (DMLS)</i>	32
3.5.5 <i>Electron Beam Melting (EBM)</i>	32
3.5.6 Comparação entre EBM e SLS.....	33
3.6 Direct Energy Deposition (DED)	34

4- Materiais utilizados na FA	37
4.1 Generalidades	37
4.2 Materiais metálicos	39
4.2.1 Aços do tipo Ferramenta e <i>Maraging</i>	39
4.2.2 Aços (outros tipos).....	39
4.2.3 Titânio comercialmente puro e ligas de titânio	40
4.2.4 Ligas de Alumínio	40
4.2.5 Ligas de Níquel	40
4.2.6 Liga de Cobalto-Crómio.....	41
4.2.7 Liga de Cobre.....	41
4.3 Métodos de produção do <i>Material Base</i>	41
5- A indústria aeronáutica em Portugal	43
5.1 Setor aeronáutico nacional	43
5.2 Organização da indústria aeronáutica - <i>supply chain</i>	44
5.3 Sociedades não financeiras ativas	46
5.4 Constituição do setor aeronáutico em Portugal	48
5.5 Influência económica do setor aeronáutico em Portugal	49
5.6 Investimento em I&D.....	50
5.7 “Cluster” aeronáutico nacional	51
5.8 Fabricação Aditiva em Portugal	55
5.8.1 Organizações habilitadas com certificado POA em Portugal	62
5.8.2 CEiiA.....	63
6- Mercado Aeronáutico Internacional	67
6.1 Fabricação aditiva no mercado internacional	69
7- Conclusões e trabalhos futuros.....	73
7.1 Síntese	73
7.2 Trabalhos futuros	77
Bibliografia	79
Anexo	83

Índice de Figuras

Figura 1 Processo generalizado da Fabricação Aditiva	6
Figura 2 Martelo de queda	8
Figura 3 Processo de fundição	9
Figura 4 Posição da Fabricação Aditiva em relação aos métodos de fabricação tradicionais ..	11
Figura 5 Processo de <i>Hot Isostatic Pressing</i>	12
Figura 6 Comparação FA vs Fabricação Convencional tendo em conta a relação do custo por parte e a quantidade de unidades produzidas	12
Figura 7 Comparação FA vs Fabricação Convencional tendo em conta custo e complexidade	13
Figura 8 Estimativa do crescimento do mercado relativo à FA	15
Figura 9 Exemplo de Cadeia de produção atual	17
Figura 10 FA por Estéreoigrafia (<i>Stereolithography Printing</i>)	21
Figura 11 Processo de FA por <i>Material Jetting</i>	23
Figura 12 Processo de <i>Binder Jetting</i>	25
Figura 13 FA por extrusão de material (<i>Material Extrusion</i>).....	27
Figura 14 Processo de <i>Selective Laser Sintering</i>	29
Figura 15 Processo de <i>Selective Laser Melting</i>	30
Figura 16 Processo de DMLS.....	32
Figura 17 Processo de <i>Electron Beam Melting</i>	32
Figura 18 Processo de <i>Direct Energy Deposition</i>	34
Figura 19 Vários tipos de equipamentos e procesos de FA	36
Figura 20 Formatos de partículas	38
Figura 21 Processo de atomização	42
Figura 22 Organização da cadeia de abastecimento na indústria aeronáutica	44
Figura 23 Evolução da organização da cadeia logística na indústria aeronáutica	45
Figura 24 Fluxo financeiro no ciclo de vida de um avião	46
Figura 25 Distribuição das Sociedades Não Financeiras por setor de atividade	47
Figura 26 Número de empresas por dimensão da sociedade industrial	47
Figura 27 Distribuição das empresas aeronáuticas em Portugal	48

Figura 28 Dados relativos ao setor aeronáutico e influência no mercado nacional	49
Figura 29 Comparação do investimento em I&D entre EUA e UE	50
Figura 30 Despesas de I&D em Portugal (% PIB) em função do tempo	51
Figura 31 Ramos da Indústria Aeronáutica Portuguesa	53
Figura 32 Constituição do “cluster” nacional e percentagem de exportações	53
Figura 33 Retorno da indústria	54
Figura 34 Distribuição do Emprego	55
Figura 35 Resultado obtido da questão “A sua organização usa atualmente a impressão 3D?”	56
Figura 36 Segmentação por setor industrial.....	57
Figura 37 Tempo que a empresa recorre a processos de fabricação aditiva	57
Figura 38 Percentagem do orçamento anual aplicado na impressão 3D	58
Figura 39 Finalidades das peças fabricadas recorrendo à fabricação aditiva	58
Figura 40 Fatores motivadores da adoção da fabricação aditiva.....	59
Figura 41 Principais dificuldades das empresas que adotaram a fabricação aditiva.....	60
Figura 42 Horizonte temporal para a adoção da fabricação aditiva	60
Figura 43 Dificuldades antecipadas pelas empresas que pretendem adotar a FA.....	61
Figura 44 Factores que levam à não adoção da fabricação aditiva	61
Figura 45 Máquina de fabricação aditiva Adira TLM	65
Figura 46 País de origem das cem maiores empresas aeronáuticas.....	68
Figura 47 Razões que levam à adoção da fabricação aditiva	69
Figura 48 Percentagem de empresas que utilizam a fabricação aditiva	70
Figura 49 Percentagem de empresas que planeia vir a utilizar a fabricação aditiva	70
Figura 50 Percentagem de empresas que não planeia vir a utilizar a fabricação aditiva.....	70
Figura 51 Principais razões para a não adoção da fabricação aditiva	71
Figura 52 Redução dos custos em função da taxa de implementação da FA	72

Índice de Tabelas

Tabela 1 Aplicações da fabricação aditiva	14
Tabela 2 Equipamento utilizado no processo de <i>Vat Photolymerization</i>	22
Tabela 3 Equipamento utilizado no processo de <i>Material Jetting</i>	24
Tabela 4 Equipamento utilizado no processo de <i>Binder Jetting</i>	26
Tabela 5 Equipamento utilizado no processo de <i>Material Extrusion</i>	28
Tabela 6 Características dos processos de EBM e SLS.....	34
Tabela 7 Equipamento utilizado no processo de <i>Direct Energy Deposition</i>	35
Tabela 8 Dez Principais Empresas do mercado aeronáutico a nível mundial	67
Tabela 9 Comparação entre Pequenas e Grandes Empresas	71

Siglas e Acrónimos

3D	Três Dimensões
ADOA	Alternative Procedures Design Organisation Approval
BCA	Business Case Analysis
CAD	Computer Aided Design
CEiiA	Centro de Engenharia e Desenvolvimento do Produto
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DOA	Design Organisations Approvals
EBPB	Electron Beam Powder Bed
ETSO	European Technical Standard Order
CS	Certification Specification
EUA	Estados Unidos da América
FA	Fabricação Aditiva
FFF	Free Form Fabrication
GER	Germany/Alemanha
LAM	Laser Additive Manufacturing
LBPB	Laser Beam Powder Bed
LCA	Life-cycle analysis
OEM	Original Equipment Manufacturer
PEM	Pequenas e Médias Empresas
POA	Production Organisations Approvals
SLM	Selective laser melting
SLS	Selective laser sintering
SMD	Shaped metal deposition
STL	Standard Tessellation Language

Definições

Fabricação Aditiva (FA) : Processo de junção de materiais para fabricar objetos, a partir de um modelo software 3D, camada-a-camada, opostamente aos métodos tradicionais de fabricação subtrativos (Cotteleer, Holdowski, & Mahto, 2014).

Rácio Buy-to-fly : é o rácio entre o peso do material inicialmente utilizado para fabricar o componente e o peso do componente quando finalizado (Arcam EBM).

Dimensionamento: é o processo de engenharia através do qual, a partir de requisitos, se estabelece a forma, selecionam os materiais, proteções de superfície, estabelecem as funcionalidades e as características de uma peça simples, componente ou sistema. O resultado final do dimensionamento traduz-se na especificação do bem dimensionado.

Componente: conjunto de peças simples que executam uma função no seio de um conjunto superior.

Sistema: é um conjunto, complexo ou não, com um ou mais componentes destinados a executar determinadas funções realizadas de forma interdependente.

1- Introdução

Com o contínuo desenvolvimento da indústria aeronáutica ao longo dos anos e com todas as previsões de crescimento para o futuro, a competitividade nesta indústria tem vindo a crescer bastante. Querer produzir-se uma maior quantidade, em menos tempo e com menores custos tornou-se um fator decisivo no dia-a-dia das empresas aeronáuticas e para tal novos métodos e ideias têm vindo a ser desenvolvidos de modo a aperfeiçoar todo este processo referente à indústria aeronáutica. Hoje em dia a fabricação da grande maioria dos componentes aeronáuticos baseia-se em processos subtrativos, ou seja, processos em que ocorre a remoção de material.

A fabricação aditiva permite a fabricação de novos tipos de componentes que atualmente não se conseguem fabricar com os atuais processos subtrativos utilizados e estender o ciclo de vida das peças criadas, através da utilização de tecnologias de reparação inovadoras.

Este processo de fabricação que contrariamente aos processos atuais adiciona material para fabricar o produto final, apresenta-se como um processo que tem vindo a crescer continuamente a um ritmo acelerado, prevendo-se que domine o mercado aeronáutico nos próximos anos. No entanto, vários estudos ainda têm que ser realizados de modo a desenvolver esta tecnologia e a traduzir para a realidade todo o potencial que está previsto.

O intuito final da dissertação baseia-se em mostrar caminhos que façam da fabricação aditiva (FA), opção nas diversas empresas do mercado português, apresentando vários dados que comprovem que a inserção desta tecnologia, no mercado aeronáutico nacional, apresenta acima de tudo vantagens para as empresas.

1.1 Objetivo da dissertação

O objetivo desta dissertação é apresentar a tecnologia de fabricação aditiva como uma possível opção para fabricar os mais diversos componentes, através de processos inovadores com diversas vantagens em relação aos métodos de fabricação atuais.

Com esta dissertação pretende-se também dar uma ideia do estado desta tecnologia no setor aeronáutico nacional e de que forma esta pode ser adaptada às empresas aeronáuticas, ou seja, apresentar caminhos e ideias que tornem a adoção da fabricação aditiva uma opção.

1.2 Limites do trabalho

Dado que Portugal no que diz respeito ao tema da fabricação aditiva ainda possui um mercado e conhecimento bastante reduzido e limitado.

O tema dos processos de fabrico é complexo e não se limita aos processos apresentados visto que tal depende da natureza do material usado, ou seja, metal, compósito, plástico ou outro tipo qualquer de material. Visto que o processo produtivo a comparar é com os processos relativos à produção de aeronaves, então ficou limitado a elementos de metal.

Outro fator que limita os resultados obtidos do estudo é o facto de que para obter-se um estudo que se assemelhe aos estudos realizados por empresas de referência sobre as perspetivas de adoção da tecnologia aditiva, seria necessário abranger o maior número possível de empresas aeronáuticas em Portugal.

1.2 Metodologia utilizada

Esta dissertação teve por base a leitura de vários artigos científicos relativos ao tema da fabricação aditiva e informações fornecidas aquando da visita ao CEiiA. A opção de realizar um questionário e enviar para as empresas não se revelou um fator determinante devido à baixa taxa de resposta que se antecipou que se iria ter face ao que se apurou em leitura preliminar, daí ter sido realizada uma comparação entre os diferentes estados da fabricação aditiva em Portugal com o mercado exterior.

O objetivo desta comparação é o de contextualizar Portugal e identificar opções que possam reforçar a dinamização da fabricação aditiva na indústria portuguesa.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação encontra-se dividida em seis capítulos:

- **Capítulo 1:** introdução ao tema da fabricação aditiva e descreve o objetivo, metodologia e limites de trabalho.
- **Capítulo 2:** estado de arte do tema retratado na dissertação e apresenta as diversas vantagens e desvantagens que constituem a tecnologia de fabricação aditiva. Apresenta também as várias indústrias em que a FA é aplicada, entre elas a indústria automóvel, médica e aeronáutica.
- **Capítulo 3:** vários processos de produção que constituem a fabricação aditiva, vantagens e desvantagens e equipamentos utilizados em cada um deles.
- **Capítulo 4:** enuncia os materiais que são utilizados para a produção de peças com a tecnologia de impressão 3D.

- **Capítulo 5:** aborda a indústria aeronáutica em Portugal e o papel da FA no país. Neste capítulo são abordados diversos temas fundamentais para perceber de que maneira a fabricação aditiva pode constituir opção para as empresas portuguesas, tais como o nível de investimento em projetos de I&D e a dimensão do mercado associado à tecnologia de fabricação aditiva em Portugal.
- **Capítulo 6:** breve alusão ao mercado aeronáutico global de modo a situar Portugal no contexto internacional e funcionar como meio de comparação.
- **Capítulo 7:** são tiradas as conclusões de todos os dados apresentados anteriormente e enunciados os possíveis caminhos a tomar de modo a constituir a FA uma opção em Portugal.
- **Anexo:** memorando referente à introdução da fabricação aditiva na indústria aeronáutica que inclui a política de Certificação EASA e a guia de certificação DOA, ADOA, POA.

2- Estado de arte

2.1 Generalidades

Neste capítulo inicial é apresentada uma breve introdução do que é e em que consiste o processo de fabricação aditiva, historial desta tecnologia, vantagens e desvantagens face aos métodos tradicionais de fabricação, indústrias em que a tecnologia está presente e também o atual estado do mercado mundial. Os processos de fabricação relativos à fabricação aditiva são também apresentados.

A fabricação aditiva, também conhecida por “*3D Printing*”, é considerada como sendo o conjunto de processos tecnológicos que através da adição de material (tipicamente camada a camada) criam um componente final tendo por base um modelo digital gerado em ambiente de *Computer-Aided-Design* (CAD). A história deste processo de fabricação já possui mais de 30 anos quando ocorreu a invenção do processo de *Stereolithography*. Desde essa altura, a tecnologia evoluiu até incluir 13 diferentes sub-tecnologias agrupadas em 7 diferentes tipos de processos (Cotteleer, Holdowski, & Mahto, 2014).

A primeira tecnologia para fabricação de componentes, camada a camada, usando um software de design (CAD) era denominada como *Rapid Prototyping*, desenvolvida nos anos 80 para criar modelos e protótipos. Esta tecnologia é uma das pioneiras no que diz respeito à fabricação aditiva sendo que as suas vantagens iniciais para o desenvolvimento do produto baseavam-se no tempo, redução de custos e possibilidade de criar geometrias complexas.

A otimização das propriedades dos materiais e dos processos passou a ser bastante importante para ser possível criar peças para testes funcionais, criar equipamento de fabricação e finalmente criar produtos para serem usados diretamente. Os diversos processos subjacentes à fabricação aditiva começam sempre com a criação de um modelo digital, através do software de modelação e dimensionamento para objetos tridimensionais (CAD), que posteriormente é convertido para um ficheiro com extensão .STL (ou seja tem formato *Stereolithography* (STL) sendo destinado a ser lido por sistemas de fabricação aditiva. Durante este processo, o modelo desenhado no software CAD é dividido em diversas camadas que contêm a informação necessária para serem futuramente fabricadas e formarem o produto final.

O ficheiro STL, criado em 1987 pela *3D Systems Inc*, é o ficheiro comum a todos os processos de Fabricação Aditiva. Com a tecnologia de *Rapid Prototyping* é possível criar rapidamente um modelo e analisá-lo para compreensão teórica ou para estudos (Cotteleer, Holdowski, & Mahto, 2014).

Hoje em dia estas tecnologias possuem outros nomes como *3D Printing*, no entanto, todas possuem os mesmos princípios de funcionamento do processo de *Rapid Prototyping* (V.Wong & Hernandez, 2012).



Figura 1 Processo generalizado da Fabricação Aditiva

Fonte: (Campbell, Williams, Ivanova, & Garrett, 2011)

Segundo Campbell et al (2011), o simples facto de ser um processo aditivo ao invés de subtrativo revela um enorme número de vantagens no que diz respeito a esta tecnologia. As linhas de montagem e de fornecimento podem ser reduzidas ou praticamente eliminadas em vários produtos, sendo que o produto final ou partes¹ de grande dimensão podem ser produzidos pela FA em apenas um processo, como se pode verificar na Figura 1.

Contrariamente ao que se passa na fabricação tradicional, nomeadamente, a montagem, em que diversas partes são criadas para dar origem a um produto final, através de processos de ligação que vão desde a rebiteagem ao aparafusamento passando pela soldadura e colagem, entre outros.

A facilidade com que em qualquer parte do mundo se dimensionam as peças, simplifica bastante a produção de componentes em todo o tipo de indústrias. *“The Internet first eliminated distance as a factor in moving information and now AM eliminates it for the material world.”* Pretende-se que o fator distância não seja um impedimento na fabricação de componentes e acima de tudo que, cada vez mais, seja possível que a produção e distribuição dos produtos estejam mais perto do consumidor.

2.2 Processos de fabricação tradicional vs fabricação aditiva

2.2.1 Processos de fabricação tradicional

Segundo Campbell et al (2011), as vantagens que a fabricação aditiva oferece em relação às técnicas tradicionais de fabricação são várias, no entanto, os processos de fabricação tradicionais são os mais usados atualmente de forma que é necessário compreender que tipo de processos são estes. Os processos de fabrico que envolvem alteração da matéria-prima são divididos em três grupos:

- Processos de enformação;
- Processos de corte;

¹ O termo partes significa em sentido lato nesta dissertação peças, componentes, sistemas, sub-sistemas, no fundo qualquer parte individual ou pertencente a um sistema maior. Não é assim a tradução do inglês de “parts” por “partes” já que teria que ser por “peça”, que é a tradução literal, o que seria restritivo.

- Processos de ligação;

2.2.1.1 Processos de Enformação

Os processos de enformação são divididos nos processos de deformação plástica nos quais o material é trabalhado no estado sólido atingindo a forma final pela deformação plástica de pré-formas iniciais e pelo processo de fundição onde o material em estado de fusão é vertido para um molde, adquirindo a forma deste após solidificação.

2.2.1.1.1 Processos de Deformação Plástica

Entre os principais processos de deformação temos os seguintes, mediante as matérias-primas que usam como base:

- **em massa:** Forjamento, Laminagem, Trefilagem e Extrusão;
- **em chapa:** Quinagem, Estampagem e Estiramento;

Em função da temperatura e do material utilizado, os processos de deformação plástica podem ser classificados como:

- **Deformação a frio:** executados entre a temperatura ambiente e $0,3 T_f$;
- **Deformação a morno:** executados na faixa entre $0,3$ e $0,5 T_f$;
- **Deformação a quente:** executados a temperaturas acima de $0,5 T_f$ (temperatura de fusão);

Nos processos de deformação plástica utilizam-se como equipamentos principais os martelos de queda e as prensas, como se verifica na Figura 2 (Instituto Politécnico de Leiria, 2011).

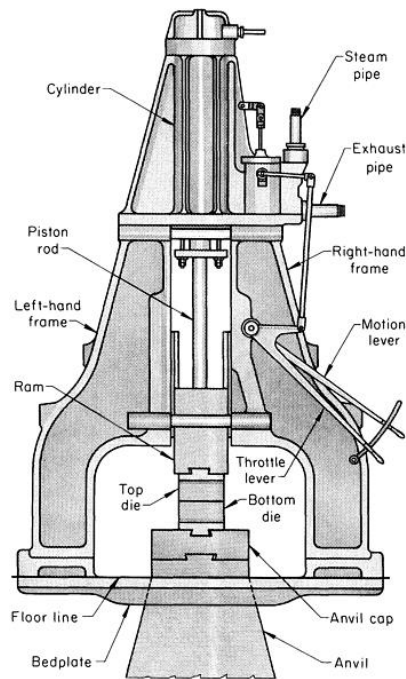


Figura 2 Martelo de queda

Fonte: <http://wiki.ued.ipleiria.pt/wikiEngenharia>

2.2.1.1.2 Processo de Fundição

O processo de fundição é um processo de fabrico em que um metal ou liga metálica, no estado líquido, é colocado num molde com o formato e medidas da peça que se pretende produzir. Este processo permite fabricar peças complexas, obter peças praticamente na forma final de uma forma relativamente rápida e com reduzido desperdício, permite também a obtenção de peças de dimensões ilimitadas e com acabamento superficial razoável, como se verifica na Figura 3.

Este processo aplica-se a vários tipos de metais tais como aços, ferros fundidos, alumínio, cobre, zinco, magnésio e ligas. Em alguns casos, os processos de fundição apresentam vantagens a outros processos de fabrico, como no caso da produção de peças complexas e com cavidades internas ou na produção de peças com dimensão elevada. No entanto as propriedades das peças fabricadas são inferiores às dos materiais fabricados com recurso a técnicas de fabricação tradicionais, tais como a fresagem, torneamento e corte por laser.

O processo de fundição é composto pela fase de fusão do metal ou da liga, vazamento num molde, solidificação da peça e finalmente pela remoção do metal ou liga solidificada do molde. Durante o processo de fundição alguns parâmetros devem ser tidos em consideração, pois influenciam a qualidade da peça final fabricada, tais como a temperatura de vazamento, a taxa de arrefecimento, a fluidez da liga, existência de turbulência e as características do molde (Instituto Politécnico de Leiria, 2011).

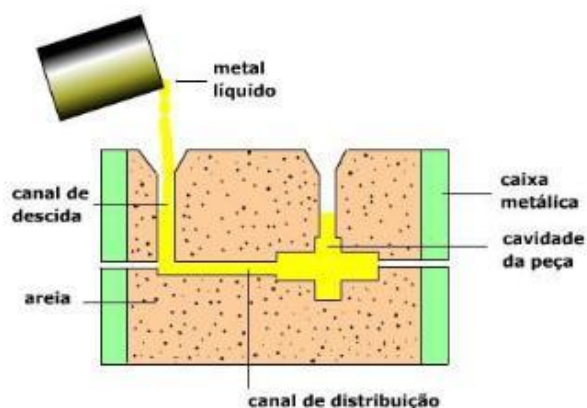


Figura 3 Processo de fundição

Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAFtbEAG/aula-fundicao>

2.2.1.2 Processos de Corte

Os processos de corte baseiam-se na fabricação da peça final por remoção de material e compreendem dois tipos de corte diferentes, corte por arranque de aparas e corte de chapas. O processo de corte por arranque de aparas remove material não necessário até à obtenção da geometria desejada.

Este processo de corte engloba três diferentes processos que são classificados mediante a quantidade de material retirado:

- **Corte por arranque de aparas macroscópica:** espessura retirada entre os 0,025 mm e 2,5mm. Exemplo: Torneamento, Fresagem, Furação;
- **Corte por arranque de aparas microscópica:** espessura retirada entre os 0,0025mm e 0,25mm. Exemplo: Rectificação;
- **Corte por arranque de aparas sub-microscópica:** espessura ainda maior que os cortes anteriores. Exemplo: Electroerosão, Ultra-sons, Bombardeamento Electrónico;

2.2.1.3 Processos de Ligação

Estes tipos de processos permitem obter peças através da união entre elas, como por exemplo:

- Soldadura;
- Rebitagem;
- Aparafusamento;

(Instituto Politécnico de Leiria, 2011)

2.2.2 Vantagens dos processos de fabricação aditiva

De salientar que todos os processos tradicionais apresentam as suas vantagens e desvantagens em relação aos métodos de fabricação aditiva, no entanto, a tecnologia de FA pretende ser apenas mais uma alternativa possível e não uma substituta destes.

Neste enquadramento apresentam-se as principais características da fabricação aditiva:

- **Complexidade das peças:** é possível criar peças com formas que não seriam possíveis de outra maneira, tal como introduzir canais de arrefecimento curvos dentro dos componentes.
- **Dimensionamento digital e fabricação:** visto que todos os componentes criados a partir de processos de FA provêm de um ficheiro digital (.STL), que representa o modelo criado em 3D, assegura que a parte criada representa fielmente aquilo que o projetista pretende fazer.
- **Complexidade acrescida:** é possível criar peças com formas e geometrias bastante elaboradas que caso fossem realizadas com recurso aos métodos tradicionais requereriam bastante tempo.
- **Produção instantânea:** o facto de se tratar de um processo que envolve um ficheiro digital permite uma rápida distribuição dos produtos a nível global, ou seja, o ficheiro pode ser enviado para qualquer impressora em qualquer parte do mundo que irá fabricar o produto dentro dos requisitos pretendidos.
- **Redução do material não aproveitado:** os processos de fabricação aditiva ao serem do tipo aditivo apenas adicionam material necessário para a fabricação da parte ao contrário dos métodos tradicionais subtrativos que retiram material o que resulta numa elevada quantidade de material não aproveitado no final do processo (Cotteleer, Holdowski, & Mahto, 2014).

2.2.3 Vantagens dos processos de fabricação tradicionais

Das principais vantagens que os métodos tradicionais atuais ² apresentam em relação à FA é de salientar os seguintes:

- **Produção em massa:** os vários processos subjacentes à fabricação tradicional, como por exemplo, estampagem, fresagem, soldadura, apresentam uma grande vantagem para a produção em elevado volume, na qual os custos são amortizados, ou seja, a fabricação aditiva é mais rentável para volumes de produção localizados entre o baixo-médio. Para partes com uma dimensão reduzida, atualmente, já é possível fabricar 2500 peças/ano (European Powder Metallurgy Association, 2015).

² Para os componentes definidos anteriormente no domínio aeronáutico.

- **Escolha de materiais:** o número de materiais disponíveis para produção em FA é muito menor que o número de materiais disponíveis para a fabricação tradicional. A fabricação aditiva tem disponíveis apenas materiais como polímeros, cerâmicas e compósitos sendo que na indústria aeronáutica o número de materiais disponíveis é ainda mais reduzido face às exigências requeridas, onde se pretendem materiais sobretudo com elevada durabilidade, resistentes ao calor e com baixo peso.
- **Dimensão das peças produzidas:** a FA apresenta ainda várias limitações no que diz respeito ao tamanho da peça produzida por cada ciclo de produção (Cotteleer, Holdowski, & Mahto, 2014).

A fabricação aditiva é atualmente vista não como um substituto dos métodos tradicionais de fabricação mas sim como uma alternativa para a produção de determinado componente. Além das várias limitações existentes no processo de fabricação aditiva esta irá depender do tipo de peça que pretendemos produzir, tal como se consegue verificar na Figura 4.

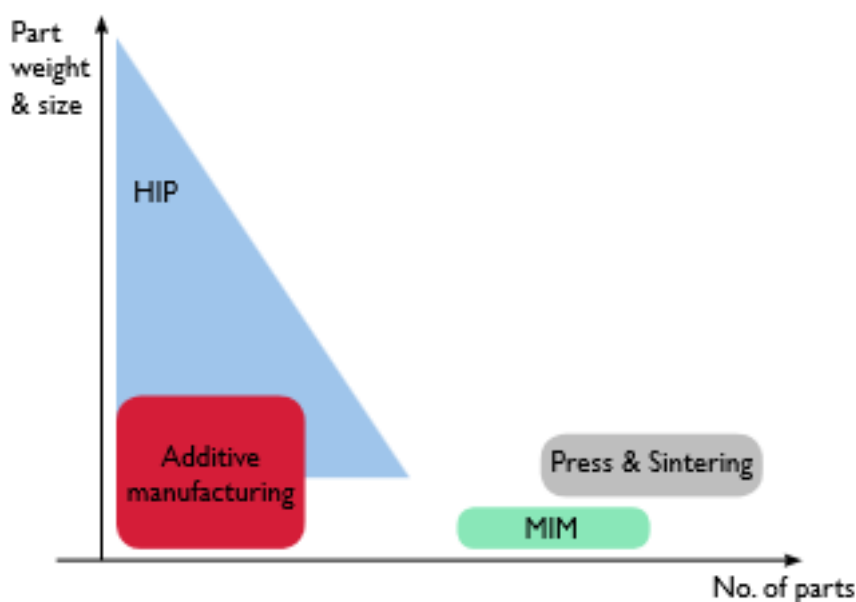


Figura 4 Posição da Fabricação Aditiva em relação aos métodos de fabricação tradicionais

Fonte: (European Powder Metallurgy Association, 2015)

- MIM- *Metal Injection Molding*
- HIP- *Hot Isostatic Pressing*

Da Figura 4 pode-se constatar que a fabricação aditiva complementa os outros processos de fabricação, sendo que processos como HIP onde se produzem partes com dimensões e peso elevado, são mais apropriados para a produção em pequena/média escala.

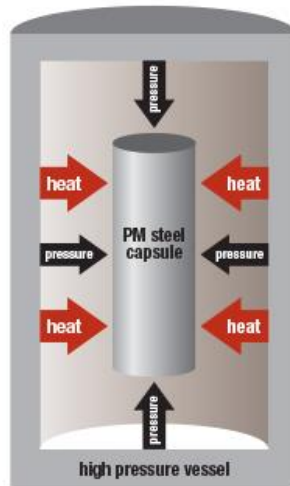


Figura 5 Processo de *Hot Isostatic Pressing*

Fonte: <https://www.deloro.com/hot-isostatic-pressing>

A FA, por sua vez, é mais apropriada na produção de pequenas partes com baixo peso oferecendo diversas vantagens. O processo de *MIM* e as tecnologias de *Press & Sintering* são mais indicadas para a produção em grande escala de partes com baixa dimensão.

Os processos de *Powder Bed*, relativos à fabricação aditiva, possibilitam a produção de peças personalizáveis, ou seja, peças que se conseguem produzir com determinadas características especiais para determinada função e com uma complexidade geométrica superior com custo reduzido, em comparação com os métodos tradicionais.

Como se pode verificar na figura 6:

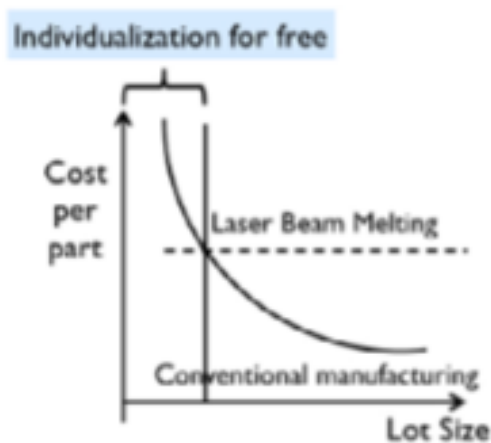


Figura 6 Comparação FA vs Fabricação Convencional tendo em conta a relação do custo por parte e a quantidade de unidades produzidas

Fonte: (European Powder Metallurgy Association, 2015)

Para a região em que se produz em menor escala, a fabricação aditiva proporciona uma personalização das partes sem um custo acrescido ao contrário da manufatura convencional que para a mesma escala de produção apresenta um custo por parte muito elevado.

De realçar que à medida que a escala de produção vai aumentando, o custo por parte relativo à fabricação convencional vai diminuindo ao contrário da fabricação aditiva que apresenta custos por parte constantes. De referir que os custos recorrentes só baixam para os processos produtivos do tipo montagem visto que têm associados curva de aprendizagem. Logo para a produção de peças simples não podemos assumir a mesma evolução.



Figura 7 Comparação FA vs Fabricação Convencional tendo em conta custo e complexidade

Fonte: (European Powder Metallurgy Association, 2015)

Da figura anterior é possível verificar que caso se pretenda produzir uma determinada parte com uma geometria mais complexa, os métodos convencionais não são apropriados na medida em que cada parte produzida terá um custo muito elevado, ao contrário da manufatura aditiva que para a mesma região potencia a produção de partes com elevada complexidade geométrica a custo zero. Obviamente isto irá depender do tipo de processo utilizado.

2.3 Aplicações da Fabricação Aditiva

Segundo Lakner (2014), a tecnologia de FA tem vindo a crescer a um nível anual de cerca de 20 %, sendo esperado que atinja valores entre os 25 e 50 milhares de milhões de dólares em 2025. Este crescimento é explicado pelo fato de que cada vez mais, empresas a nível mundial optarem por considerar a FA como uma possível alternativa para a produção dos seus componentes, simplificando aspetos importantes nas cadeias de produção atuais tais como a proximidade ao cliente, localização do produto e a complexidade de gestão como é possível ver na tabela 1.

Tabela 1 Aplicações da fabricação aditiva

Fonte: (Deloitte analysis, 2012)

Indústria	Aplicações atuais	Potenciais Aplicações Futuras
Aeronáutica e defesa	<ul style="list-style-type: none"> - Criação de modelos e protótipos - Produção de partes estruturais e não estruturais - Fabricação de peças de substituição com pequenos volumes 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabricação de peças com componentes electrónicos incluídos - Fabricação de peças do motor complexas - Componentes da asa das aeronaves - Outros componentes estruturais da aeronave
Espacial	<ul style="list-style-type: none"> - Peças especialmente personalizadas para a exploração espacial - Fabricação de estruturas utilizando materiais com baixo peso e elevada resistência. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fabricação de pequenas peças diretamente no espaço quando necessário - Fabricação de estruturas de elevadas dimensões diretamente no espaço
Automóvel	<ul style="list-style-type: none"> - Protótipos e fabricação de peças prontas a serem usadas. - Fabricação de peças para uso em carros antigos e de corrida. - Rápida produção de peças. 	<ul style="list-style-type: none"> - Componentes automóveis com estrutura e geometria mais complexa

Médica	<ul style="list-style-type: none"> - Próteses e implantes - Instrumentos e modelos médicos - Implantes dentários e aparelhos auditivos 	<ul style="list-style-type: none"> - Desenvolvimento de órgãos para transplantes - Produção em larga escala de produtos farmacêuticos - Desenvolvimento de tecidos humanos para terapias regenerativas
Produtos para o consumidor	<ul style="list-style-type: none"> - Protótipos - Relógios e joalheria personalizada 	<ul style="list-style-type: none"> - Design personalizado de espaços habitacionais - Co-Design e criação diretamente com os consumidores

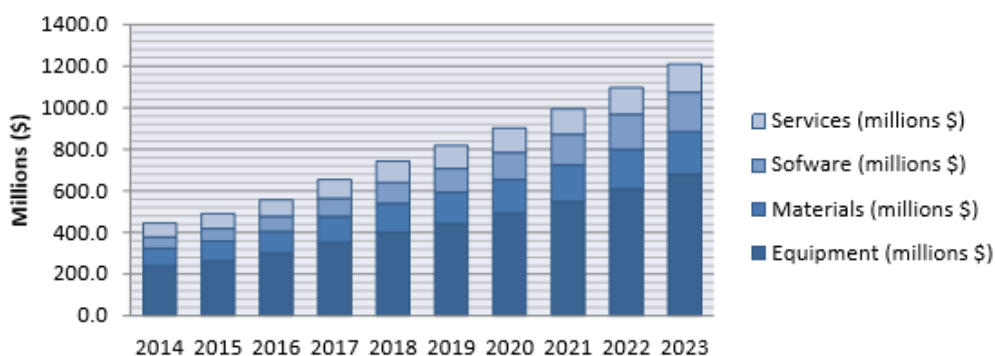


Figura 8 Estimativa do crescimento do mercado relativo à FA

Fonte: <https://www.smartechpublishing.com/images/uploads/general/AerospaceWP.pdf>

2.3.1 Indústria Médica

Para algumas aplicações, como por exemplo, na indústria médica, a tecnologia de dimensionamento em ambiente 3D, já oferece vantagens em termos de produção em relação aos métodos de fabricação atuais visto que em lotes pequenos ou em partes que apresentam uma geometria complexa e personalizada, a fabricação aditiva disponibiliza um custo por unidade muito inferior caso essa unidade fosse produzida usando os métodos tradicionais (The World Medical Markets Facts Book, 2012).

De salientar que cada vez mais avanços no ramo da indústria médica têm vindo a ser realizados tais como a fabricação de órgãos em 3D e artérias. Esta indústria médica/tecnológica todos os anos apresenta um retorno financeiro enorme o que lhe permite

continuar a investir em novas tecnologias. Em 2012 apresentou um retorno de 126 milhares de milhões de dólares com um crescimento anual esperado de 5,4 % (The World Medical Markets Facts Book, 2012).

Segundo Snyder et al (2014), em 2012, a indústria médica representava, aproximadamente 16,4 % do total de lucro proveniente do uso da fabricação aditiva a nível global, o que é explicado pelo facto dos componentes utilizados nesta indústria se alinharem com as características de produção relativas à tecnologia 3D.

Vários aparelhos médicos utilizados mundialmente hoje em dia, tais como implantes cirúrgicos e componentes ligados à medicina dentária são relativamente pequenos em tamanho, sendo ideais para a produção em 3D já que uma das limitações atuais desta tecnologia é a dimensão das partes produzidas.

A outra vantagem que esta indústria apresenta é que a maioria destes componentes são de pequenas dimensões mas no entanto apresentam um elevado preço para o consumidor, tendo estes produtos elevado valor para a indústria da FA (“*value-dense products*”) (Snyder, Cotteleer, & Kotek, 2014).

O elevado nível de personalização associado à FA torna esta tecnologia bastante útil para a indústria médica na medida em que serve as necessidades específicas de um determinado paciente o que é importante para a eficácia clínica.

2.3.2 Indústria Automóvel

Considerando que a indústria automóvel se apresenta como um dos principais setores relativos à fabricação aditiva, são várias as vantagens que provêm do desenvolvimento desta tecnologia a nível global.

Segundo Giffi et al (2014), os avanços tecnológicos relativos a esta tecnologia durante a presente década têm permitido que a indústria automóvel se desenvolva em diversos aspectos tais como a possibilidade da fabricação de partes com novos designs, mais leves, com melhor qualidade e um custo inferior.

A fabricação aditiva é atualmente utilizada pelos OEMs (*Original Equipment Manufacturers*) para a fabricação de protótipos, no entanto, pretende-se que esta tecnologia esteja ligada à produção de partes finais em grandes volumes, no futuro.

Num mercado bastante competitivo, onde em 2013 as quatro principais OEMs possuíam um terço do mercado respetivo à indústria de fabricação automóvel a nível global (> 2 triliões de dólares), o resto do setor é caracterizado por um número elevado de empresas de menor dimensão que para atingirem o sucesso pretendido e se tornarem cada vez mais competitivas, se focam em certos parâmetros específicos, entre os quais, a qualidade do produto produzido, tipo de materiais utilizados e resposta ao consumidor.

O facto da FA permitir a fabricação de componentes com menos restrições de design que geralmente restringem os processos de manufatura tradicionais, faz com que exista uma flexibilidade que permite a fabricação de novos componentes personalizados com novas

funcionalidades integradas (circuitos eléctricos), com menor peso, com formas mais complexas e com vários materiais presentes numa só parte fabricada. Todas estas vantagens relativas à fabricação aditiva apresentam-se como o fio condutor para no futuro ser possível fabricar veículos mais rápidos, mais leves, mais seguros e mais eficientes.

Além de ser uma fonte de inovação no que diz respeito à fabricação de componentes, a FA também apresenta uma enorme vantagem no que diz respeito ao desenvolvimento das linhas de produção em cadeia que é bastante importante para as empresas que pretendem ter cada vez mais relevo no mercado atual.

O objetivo principal consiste em tornar estas linhas de produção em cadeia cada vez mais curtas, ou seja, a FA reduz o tempo total de produção que por sua vez aumentará a capacidade de resposta do mercado.

Obviamente que isto é conseguido pela capacidade da FA fabricar peças prontas a serem utilizadas, peças essas que são produzidas sem qualquer desperdício de material (processo aditivo), diminuindo o uso de material necessário.

Além disso, a capacidade para conseguir produzir qualquer tipo de peças em qualquer parte do globo (*On-demand and On-location production*) faz com que os custos de inventário baixem. Todas estas vantagens provenientes da FA ajudam as empresas a alterarem as suas linhas de produção em cadeia já que os produtos são fabricados a custos inferiores e a capacidade de se produzir cada vez mais perto do consumidor reduz a complexidade da linha de produção.

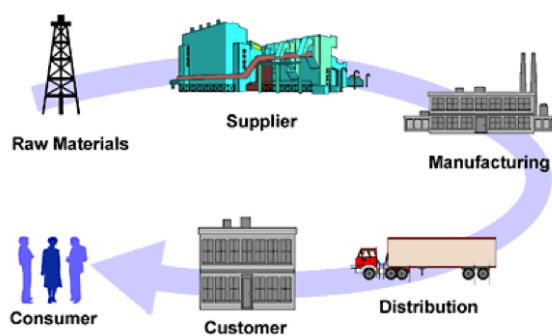


Figura 9 Exemplo de Cadeia de produção atual

Fonte: <http://data-magnum.com/predictive-analytics-in-the-supply-chain/>

2.3.3 Indústria Aeroespacial

Em 2016 durante o festival aéreo de Berlim, a *Airbus* apresentou a primeira aeronave totalmente fabricada recorrendo à fabricação aditiva. A *Thor* (*Testing High-tech Objectives in Reality*), com uma massa de apenas 21 kg e menos de 4 metros de comprimento, é considerada pela *Airbus* como um marco no que diz respeito à maneira como as aeronaves são fabricadas atualmente (Fell, 2016).

A empresa de fabricação aeroespacial tem vindo a fabricar componentes com recurso à tecnologia 3D, replicando estruturas que se encontram na natureza e daí criar partes resistentes e ao mesmo tempo leves (Fell, 2016).

Um dos exemplos recentes foi o da fabricação de um protótipo (*air spoiler*) em que a empresa se inspirou na planta aquática *Victoria Amazonica* que consegue suportar nas suas folhas o peso equivalente a uma criança. Após uma investigação detalhada das folhas da planta, descobriu-se que estas possuem uma estrutura com vários triângulos e rectângulos com a mesma dimensão ao longo da superfície para reduzir o peso. A *Airbus* analisou a estrutura de baixo peso das folhas da planta e a maneira como as cargas se distribuem ao longo das mesmas (Fell, 2016).

A fabricação de peças com este tipo de design inovador são particularmente essenciais para a indústria aeroespacial visto que reduzir o peso enquanto se mantém a resistência é uma prioridade na indústria.

Atualmente as empresas aeroespaciais possuem várias técnicas de fabricação aditiva que podem utilizar tais como *Fused Deposition Modeling* que é bastante utilizada. A empresa *Honeywell Aerospace* foi uma das primeiras a investir na fabricação aditiva e até ao momento já investiu em laboratórios na China, Índia, Europa e Estados Unidos. Tal investimento é justificado pelo facto de que à medida que a indústria aeroespacial continua a crescer, é necessário adotar processos de fabricação que sejam eficientes e consigam responder às exigências do mercado (Fell, 2016).

A empresa aeroespacial *GE Aviation* tornou-se em 2016 a primeira empresa de fabricação aeroespacial a conseguir uma aprovação pela *US Federal Aviation Administration* (FAA) para um componente produzido com recurso à tecnologia 3D que seria aplicada num motor de uma aeronave (*Boeing 777*) (Fell, 2016).

A fabricação aditiva surge como uma alternativa bastante interessante na medida em que facilita a manutenção e reparação das aeronaves, especialmente os modelos mais antigos, visto que se torna difícil por vezes obter determinado componente fabricado pelos métodos tradicionais³.

O caso do *Boeing 737* e do *Airbus A320*, que representam os dois modelos mais utilizados e cujos projetos datam dos anos 60 e 80 respetivamente, são dois exemplos que se

³ Uma vez que quase sempre implica a abertura do processo produtivo por vezes já encerrado, obrigando a criar ferramentas de produção de peças simples e de montagem.

aplicam e que embora os projetos se tenham desenvolvido ao longo dos anos, muitos dos componentes continuam iguais, com as reparações a serem realizadas com base no design original.

Como resposta à necessidade da introdução de novas técnicas de reparação, em 2013, foi fundado o grupo *European RepAIR project*, que envolve 12 parceiros incluindo a *Boeing* e a *Lufthansa Technik*, que investiga o potencial da FA para diminuir os custos de manutenção, reparação e operação (Fell, 2016).

Segundo Coykendall et al (2014), a aplicação da FA na indústria aeroespacial, hoje em dia, vai desde a fabricação de componentes relativamente simples e não estruturais (apoio de braço, cintos de segurança) até à fabricação de partes mais complexas (componente do motor de uma aeronave).

No dia 4 de Abril de 2017, a EASA (*European Aviation Safety Agency*), emitiu um memorando referente à introdução da fabricação aditiva na indústria aeronáutica, sobretudo no que diz respeito ao uso das tecnologias de fabricação aditiva em aeronaves, peças e aplicações sujeitas à *EASA Type Certification*, como é possível ver no anexo apresentado no final do trabalho.

Atualmente, as empresas encontram-se em diferentes níveis no que diz respeito à utilização da tecnologia 3D para a fabricação de partes, havendo um certo debate sobre qual será o impacto da FA nos processos tradicionais. Tal como na indústria médica e automóvel, as vantagens que realçam baseiam-se essencialmente:

- **Redução do custo de produção:** A fabricação aditiva não necessita de ferramentas específicas (ex: moldes) para fabricar determinado componente, daí não existirem custos com o projeto deste tipo de ferramentas de produção. O fato de se produzir um componente que está pronto a ser utilizado também simplifica o processo de montagem e o controlo de qualidade.
- **Menor desperdício de material:** Através das técnicas de fabricação tradicionais, o desperdício de material ronda os 80-90% enquanto que utilizando a FA é reduzido para valores a rondar os 10-20%.
- Segundo Dehoff et al (2013) o rácio *buy-to-fly* de um componente utilizado pela empresa Lockheed Martin, relativo ao detetor de fugas de ar do motor (*BALD- Bleed Air Leak Detect*), pode ser reduzido de 33:1 para 1:1 através da utilização da técnica de *Electron Beam Melting*.
- **Redução do peso:** A fabricação aditiva é capaz de produzir partes resistentes, com um baixo peso e ao mesmo tempo manter o desempenho das mesmas. A fabricação de uma peça com baixo peso é um dos fatores chave para reduzir o consumo de combustível bem como as emissões de CO₂. Por exemplo, a *Airbus* para produzir um componente relativo à nacela da aeronave A320 utilizou a técnica de *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) para otimizar um design que reduziu o peso total da peça em cerca de 64%.

- **Reduzido “time to market”**: quando as empresas aeroespaciais utilizam a FA em detrimento das técnicas tradicionais, estas podem beneficiar, em termos de tempo de fabricação de um protótipo, entre 43% e 75% dependendo da técnica utilizada (Arcam EBM, s.d.).

3- Processos produtivos em FA

Neste capítulo apresentam-se os vários processos produtivos que compõem a tecnologia de fabricação aditiva, entre eles *Vat Photopolymerization*, *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Material Extrusion*, *Powder Bed Fusion*, *Direct Energy Deposition*, *Selective Laser Sintering*, *Selective Laser Melting*, *Electron Beam Melting* e *Direct Metal Laser Sintering*.

Em todos estes processos são enunciadas as várias vantagens e desvantagens, bem como o tipo de material utilizado e equipamento de produção, associado a cada um destes.

3.1 *Vat Photopolymerization*

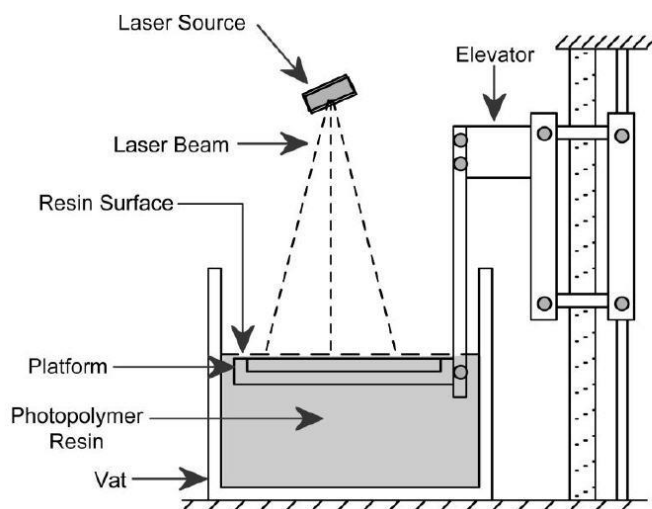


Figura 10 FA por Estereolitografia (*Stereolithography Printing*)

Fonte: <https://www.emaze.com/@AWZLTWZO/3D-Printing>

Este processo também denominado como *SLA Process*, utiliza uma cuba que contém resina fotopolimerizável, através do qual, o modelo pretendido é construído através da incidência de uma luz ultravioleta que é utilizada para endurecer e curar a resina onde é requerido. A plataforma movimenta-se no sentido descendente à medida que o modelo é fabricado (Loughborough University, s.d.).

As resinas são curadas através de um processo de polimerização onde a luz é direcionada ao longo da superfície da camada de resina com a ajuda de espelhos.

Basicamente este processo pode ser resumido da seguinte forma:

- 1) A plataforma de construção movimenta-se no sentido descendente com um deslocamento correspondente à espessura da camada.
- 2) Luz ultravioleta cura a resina camada-a-camada enquanto a plataforma se continua a movimentar no sentido descendente e camadas adicionais são construídas em cima das anteriores.

- 3) Algumas máquinas utilizam pás de limpeza que promovem um acabamento mais suave entre a transição de camadas.
- 4) Após a conclusão, a resina é removida da cuba e o objeto retirado.

Materiais utilizados: Polímeros e cerâmicas

Polímeros- UV Curable Photopolymer Resin⁴

Pós-processamento⁵

Este processo exige pós-processamento, já que é necessária alguma limpeza extra visto que após a fabricação da peça ainda se encontram alguns excessos de resina que tornam a superfície rugosa. A luz ultravioleta é usada por vezes como um processo de pós-cura de modo a garantir um objeto de alta qualidade.

Exemplo de equipamento de produção utilizado:

Tabela 2 Equipamento utilizado no processo de *Vat Photolymerization*

Impressora	Tamanho máximo da peça produzida	Área de construção
3D Systems ProX 950	450 Kg	1500mm x 750mm x 550mm

Como síntese das características deste processo pode-se referir:

Vantagens:

- Alto grau de precisão e bom acabamento superficial em comparação com os outros processos existentes;
- Relativamente rápido em comparação com os outros processos;
- Tipicamente grande envelope de construção;

⁴ Polímeros cuja cura se faz por exposição à luz UV.

⁵ A fabricação aditiva pode exigir trabalho adicional no final da peça ter sido produzida, nomeadamente, limpeza, polimento, pintura ou até remoção de estruturas de apoio/suporte que são co-produzidas com a peça, para garantir que esta durante a fase de manufatura se mantém na mesma posição evitando movimento. Esta fase, se necessária, é conhecida por pós-processamento.

Desvantagens:

- Processo relativamente rápido face às outras tecnologias de FA existentes;
- Demorado processo de acabamento após fabricação devido à necessidade de pós-processamento;
- Requer material de suporte, ou seja, material que ajuda na produção e processos de pós-cura para o material ser suficiente resistente de modo a para ser usado como elemento final;

3.2 *Material Jetting*

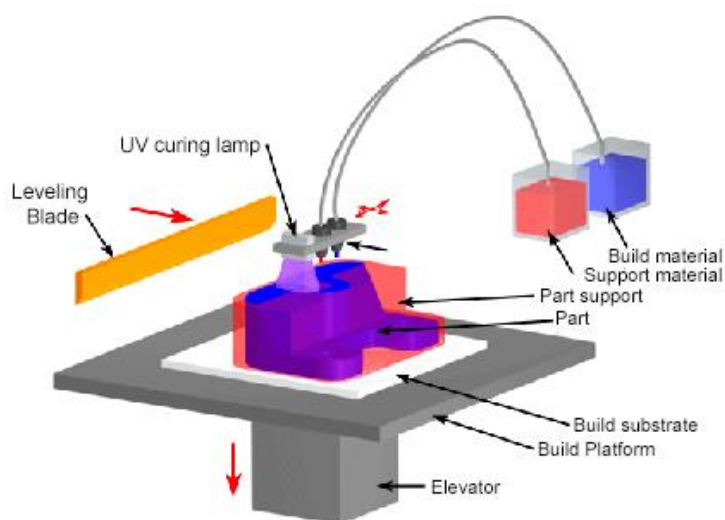


Figura 11 Processo de FA por *Material Jetting*

Fonte: [https:// www.lboro.ac.uk](https://www.lboro.ac.uk)

Este processo produz objetos de uma forma similar a uma impressora 2D onde o material é inserido na plataforma, de uma forma contínua ou apenas onde for necessário (*Drop on Demand*), solidifica e forma o objeto camada a camada (Loughborough University).

Este material é depositado através de um bico que se movimenta horizontalmente ao longo da plataforma de construção. O processo de *Material Jetting* utilizada principalmente como materiais polímeros e plásticos.

De uma forma resumida, a cabeça da impressora é inicialmente posicionada por cima da plataforma de construção onde depois deposita na superfície de construção o material, criando a primeira camada. As seguintes camadas são construídas sempre em cima da anterior e são arrefecidas, endurecidas e curadas por luz ultravioleta.

Após a conclusão do processo, é necessário remover o material de suporte utilizando uma solução de hidróxido de sódio ou recorrer a um jato de água. Visto que se trata de um

processo com alta precisão, em que a espessura das camadas depositadas é muito reduzida o que permite obter formas curvas complexas, o tratamento após o processamento da peça requerido é limitado sendo que as propriedades desta são estabelecidas aquando o processo de impressão. Na tabela abaixo é possível verificar as principais características do equipamento utilizado neste processo.

Exemplo de equipamento de produção utilizado:

Tabela 3 Equipamento utilizado no processo de *Material Jetting*

Impressora	Área de construção	Espessura da camada	Número de cores
Object 500 Connex 3	490 x 390 x 200 mm	Layer thickness 16 microns	46

Como síntese das características deste processo pode-se referir:

Materiais utilizados: Polímeros e ceras;

Vantagens:

- Alta precisão na deposição do material e por consequência menor desperdício;
- Permite a produção de partes com múltiplos materiais e cores em apenas um processo;

Desvantagens:

- É necessário material de suporte;
- Uma alta precisão é conseguida, no entanto, os materiais são limitados e apenas polímeros e ceras;

3.3 *Binder Jetting*

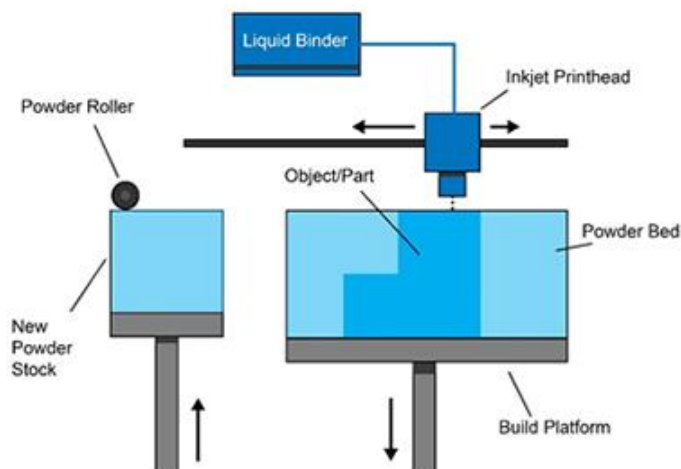


Figura 12 Processo de *Binder Jetting*

Fonte: <https://www.lbora.ac.uk>

O processo de *Binder Jetting*, também conhecido como *3DP Technology*, utiliza 2 materiais para a produção do objeto, *powder based material* e um *binder material* (Loughborough University).

O *powder based material* é o material de base que permite a obtenção da forma, o qual é depositado em conjunto com o *binder material* cuja função é atuar como material que permite ao *powder based material* ser curado de modo a ganhar forma. Este encontra-se no estado líquido e as camadas no estado sólido. O processo de funcionamento consiste no movimento da cabeça da impressora, ao longo dos eixos x e y, depositando em simultâneo o *powder based* e o *binder*.

Após a formação de cada camada, a plataforma de construção baixa na medida da espessura de cada camada do modelo.

Como os outros processos baseados em *powder base*, o objeto produzido é suportado dentro da *powder bed* e é removido após ser concluído.

Devido ao processo tecnológico que assenta num processo de cura que envolve a combinação de 2 materiais, as características do material não são sempre as melhores para a produção de partes estruturais e apesar da relativa rapidez com que o material é produzido, é necessário realizar pós-tratamento após produção para fortalecer o objeto criado e assegurar que o *binder material* garante as melhores propriedades mecânicas e estruturais, o que atrasa o tempo total de produção.

Este é um processo que em regra geral é mais rápido que os outros e que permite a utilização de cores na produção da peça, podendo ser usado como *powder based material* pós metálicos, polímeros e cerâmicas.

Materiais utilizados no processo: Cerâmicas, plásticos, metais e compósitos

Exemplo de equipamento de produção utilizado:

Tabela 4 Equipamento utilizado no processo de *Binder Jetting*

Impressora	Espessura da camada	Velocidade de impressão
Spectrum Z 500	0.089 - 0.203 mm	2 camadas/minuto

Como síntese das características deste processo pode-se referir:

Vantagens:

- O objeto pode ser produzido com diferentes cores;
- Utiliza uma diversa gama de materiais: metais, polímeros e cerâmicas;
- Processo mais rápido que os outros;

Desvantagens:

- Nem sempre serve para produzir partes estruturais devido à utilização do *binder material*;
- O tratamento após produção pode adicionar bastante tempo ao processo total

3.4 *Material Extrusion*

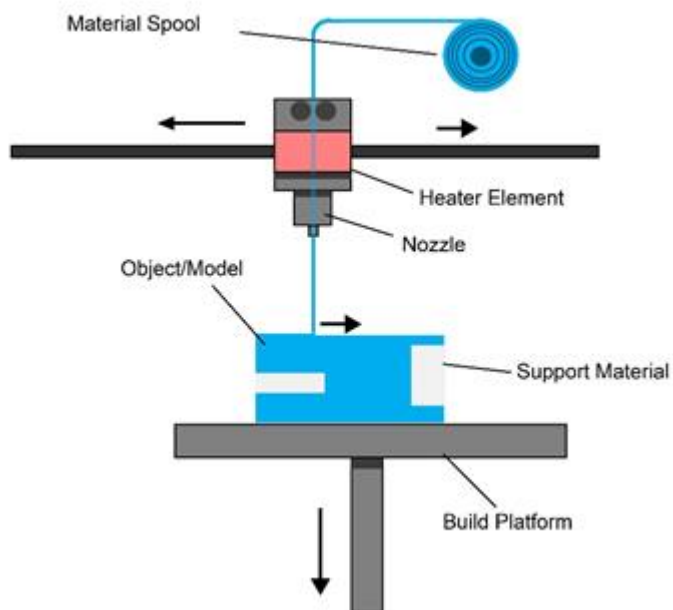


Figura 13 FA por extrusão de material (*Material Extrusion*)

Fonte: <https://www.lboro.ac.uk>

Fuse deposition modelling (FDM) é um processo de FA que recorre à extrusão de material sendo um dos processos mais utilizados, onde o material é projetado pelo bico (*nozzle*) que se encontra aquecido e que permite o depósito do material camada a camada na superfície de construção (Loughborough University).

É uma técnica bastante utilizada nas impressoras 3D domésticas e de baixo custo. Apesar de ser um processo bastante parecido a todos os outros que compreendem a Manufatura Aditiva, visto que produz o objeto camada a camada, o fator de diferenciação baseia-se no facto de que o material é adicionado pelo *nozzle* sob ação de uma pressão constante e num feixe contínuo.

Esta pressão tem de ser controlada e mantida a uma velocidade constante para se conseguir a criação de objetos precisos, ou seja, que respeitem o desenho digital que está na base. As camadas de material podem ser unidas através do controlo da temperatura ou com uso de agentes químicos. Este é um processo que utiliza como material de adição polímeros termoplásticos

Este processo requer o controlo de diversos fatores de modo a obter um objeto com um acabamento de qualidade.

Exemplo de equipamento de produção utilizado:

Tabela 5 Equipamento utilizado no processo de *Material Extrusion*

Impressora	Área	Materias da camada	Volume de construção
Insstek MX3	1000 x 800 x 650 mm	Al, Co, Cu, ligas de níquel, termoplásticos	520l

Como síntese das características deste processo pode-se referir:

Vantagens:

- Processo de custo reduzido;
- Plástico ABS ⁶pode ser utilizado o que permite boas propriedades estruturais e é facilmente acessível ao consumidor;

Desvantagens:

- Raio do bico de deposição limita e reduz a qualidade final;
- A precisão e a velocidade são baixas quando comparado com outros processos ;
- Pressão constante do material é requerida de modo a aumentar a qualidade do produto final;

3.5 *Powder Bed Fusion*

Este processo engloba diversos métodos de produção diferentes entre si, a saber (Cotteleer, Holdowski, & Mahto, 2014):

- *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS);
- *Electron Beam Melting* (EBM);
- *Selective laser Melting* (SLM);
- *Selective Heat Sintering* (SHS);
- *Selective laser Sintering* (SLS).

Em todos estes processos é utilizado um feixe de luz laser ou um feixe de eletrões para derreter e fundir o material em pó. O processo consiste na deposição de várias camadas de determinada espessura (tipicamente 0,1mm) uma após a outra, repetindo-se o processo camada-a-camada até o objeto estar formado.

⁶ Plástico ABS (Acrlonitrila-Butadieno-Estireno) - é um termoplástico desenvolvido para aplicações que necessitem de uma boa resistência ao impacto e um bom aspeto visual.

A empresa sueca ARCAM produz o único sistema *Powder Bed Electron Beam*, Arcam A2 (Loughborough University).

3.5.1 *Selective Laser Sintering* (SLS)

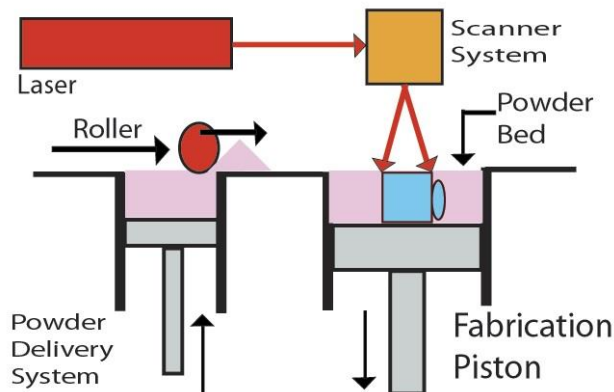


Figura 14 Processo de *Selective Laser Sintering*

Fonte: <https://www.just3d.in>

Este processo inicia-se com a deposição de uma camada de material em pó na superfície de construção que é derretida pelo laser (ou múltiplos lasers).

A plataforma de construção é depois rebaixada para que a próxima camada de plástico em pó seja formada, repetindo-se o processo de deposição e derretimento até que o objeto esteja formado.

Este é um processo que não requer qualquer superfície de suporte da estrutura visto que as partes construídas são sustentadas pela camada de material plástico em pó que não foi utilizado.

As máquinas utilizadas neste processo são compostas por três componentes, uma fonte de calor para fundir o material, um mecanismo para controlar esta fonte de calor e um mecanismo que adiciona as camadas novas em cima das já criadas. A plataforma de construção encontra-se dentro de uma câmara com temperatura controlada, onde a temperatura é geralmente uns graus inferior ao ponto de fusão do material, reduzindo a dependência do laser para fundir as camadas. É também utilizado dentro da câmara óxido nítrico de modo a maximizar a oxidação e a qualidade do objeto produzido.

Quanto a vantagens e desvantagens, esta tecnologia produz objetos em plástico com boas propriedades mecânicas, para pequenos lotes de produção é um processo que apresenta uma boa solução económica.

As peças produzidas, no entanto, não possuem as mesmas propriedades do que aquelas que são produzidas utilizando um molde de injeção, especialmente no que diz respeito ao acabamento da superfície (Loughborough University).

3.5.2 Selective Laser Melting (SLM)

Este é um processo de produção, que comparado com o de *Selective Laser Sintering*, se apresenta como sendo mais rápido, requer o uso de um gás inerte, apresenta maiores custos no que diz respeito a gastos de energia e tipicamente tem uma eficiência energética mais fraca (10 a 20%).

O processo de SLM é uma forma avançada do processo de SLS, onde o processo de fundição do material é obtido pela utilização de vários lasers. Este processo foi inicialmente desenvolvido pela empresa *Fockele and Schwarze (F&S)* em cooperação com o *Fraunhofer Institute of Laser Technology* em 1999 e mais tarde comercializado pela empresa *MCP HEK GmbH* (atualmente *SLM Solutions GmbH*).

Durante os últimos anos, os fabricantes das máquinas de produção, preocupam-se em desenvolver cada vez mais a capacidade de fabricação das mesmas visto que a grande maioria dos processos de *Powder Bed Fusion* apresenta uma baixa taxa de construção (5-20 cm^3/hr) e a dimensão máxima que se consegue obter é de 250 x 250 x 325 mm^3 .

A empresa alemã *SLM Solutions* lançou em 2012 a máquina SLM500 HL que utiliza dois conjuntos de lasers (conjunto com um laser de 400 W e outro de 1000 W), o que significa que quatro lasers produzem em simultâneo, o que resulta no aumento da taxa de construção para cerca de 35 cm^3/hr e com um volume de produção de 500 x 350 x 300 mm^3 .

O instituto *Fraunhofer* desenvolveu também a máquina para metais (X line 1000R) com um volume de construção de 630 x 400 x 500 m^3 e uma taxa de construção de 100 cm^3/hr (Bhavar, et al., 2014).

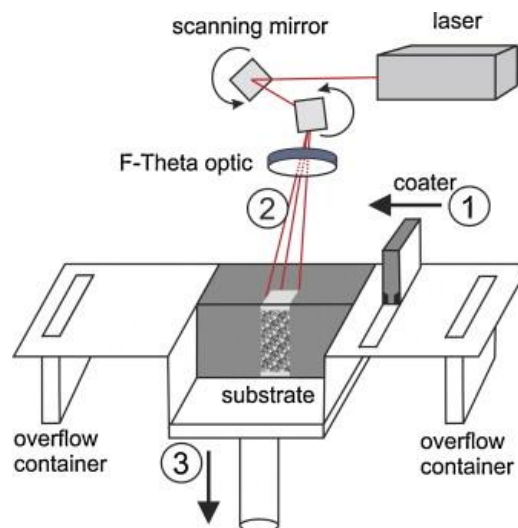


Figura 15 Processo de *Selective Laser Melting*

Fonte: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013614001277>

Os principais fabricantes de sistemas de SLM são os seguintes :

- 3D Systems (EUA)
- Concept Laser (GER)
- EOS (GER)
- Matsuura (JP)
- Realizer (GER)
- Renishaw (UK)
- SLM Solutions (GER)

(European Powder Metallurgy Association, 2015)

3.5.3 *Selective Heat Sintering* (SHS)

Esta tecnologia utiliza uma cabeça da impressora termicamente aquecida, para fundir o material em pó, em vez de um laser, o que faz com que se reduzam significativamente as quantidades de calor e energia requeridas. É visto como um processo *low cost* em comparação com o de *Selective Laser Sintering*, mais utilizado para produzir protótipos e menos para partes estruturais (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2014).

3.5.4 Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Utiliza o mesmo processo que a SLS, no entanto utiliza metais em pó e não plásticos. Este processo foi desenvolvido pela empresa EOS e a potência típica do laser é de cerca de 200-400 W (Bikas, Stavropoulos, & Chryssolouris, 2014).

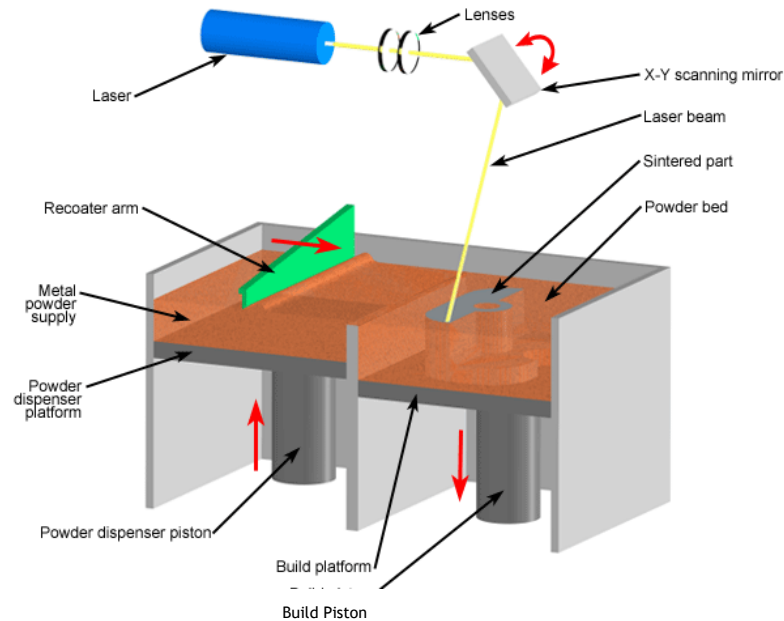


Figura 16 Processo de DMLS

Fonte: <http://www.custompartnet.com/wu/direct-metal-laser-sintering>

3.5.5 Electron Beam Melting (EBM)

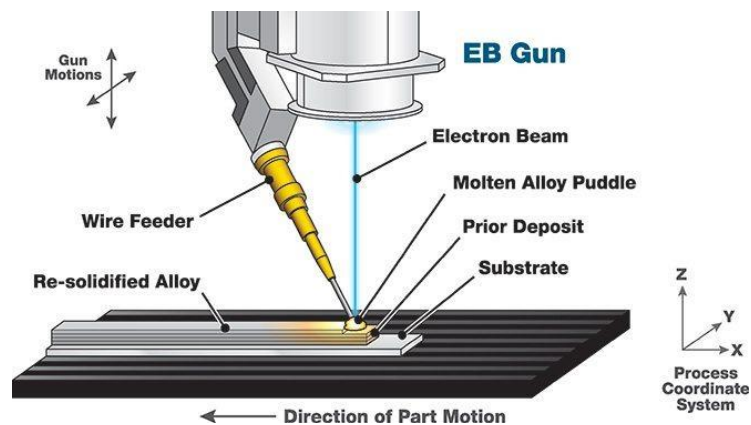


Figura 17 Processo de *Electron Beam Melting*

Fonte: <https://www.3dprintingindustry.com>

Sendo um processo bastante similar ao SLM (*Selective Laser Melting*), ao invés de se usar um laser, recorre-se a um feixe de eletrões para fundir o material num ambiente em vácuo. Este sistema começou a ser comercializado pela empresa sueca ARCAM em 1997.

Neste processo, um filamento de tungstênio aquecido emite eletrões a alta velocidade que são controlados por duas lentes magnéticas, a lente de focagem e a lente de deflexão.

A função da lente de focagem é focar o feixe no diâmetro desejado até 0.1 mm enquanto que a função da lente de deflexão é fazer com que o feixe incida na direção desejada ao longo da camada de material. Quando os eletrões incidem na camada de material, a sua energia cinética é transformada em energia térmica, fundindo o material, sendo que a formação de cada camada consiste em duas fases (pré-aquecimento e fundição).

Todo este processo ocorre numa câmara de alto vácuo com pressão característica entre 10^{-4} e 10^{-5} mbar. O hélio presente durante a fase de fundição ajuda a reduzir a pressão de vácuo que por sua vez irá influenciar o arrefecimento da peça e a estabilidade do feixe de eletrões (Bhavar, et al., 2014).

Esta tecnologia apresenta como principal vantagem conseguir produzir objetos em metal com elevada densidade e com boas propriedades mecânicas comparativamente às tecnologias de produção tradicionais.

3.5.6 Comparação entre EBM e SLS

Segundo Bhavar et al (2014), o processo de EBM apresenta maior taxa de construção do que o processo de SLS devido à elevada densidade energética e às elevadas velocidades de varrimento do feixe que incide no material (*scanning*), no entanto possui um acabamento de superfície com qualidade inferior.

No processo de EBM os suportes requeridos são apenas para a condução de calor e não para suporte estrutural o que faz com que seja possível fabricar partes com formas geométricas complexas.

Apesar destas vantagens, o processo de EBM não é tão popular como o de SLS devido ao elevado custo das máquinas de fabricação, baixa precisão e falta de disponibilidade de fabrico de partes de elevadas dimensões. As características de ambos os processos estão presentes na tabela 6.

Tabela 6 Características dos processos de EBM e SLS

	SLM	EBM
Fonte de Energia	1 ou mais lasers de 200 a 1000 W	Feixe de elétrons de 3000 W
Ambiente da câmara de fabricação	Argon ou azoto	Vácuo / Hélio
Método de pré-aquecimento do material	Aquecimento da plataforma	Scan de pré-aquecimento
Temperatura de pré-aquecimento do material (graus celsius)	100-200	700-900
Volume de construção máximo (mm ³)	500 x 350 x 300	350 x 380
Máxima taxa de construção (cm ³ /hr)	20-35	80
Espessura da camada (µm)	20-100	50-200
Acabamento da superfície (Ra ⁷)	4-11	25-35
Tolerância geométrica (mm)	± 0.05-0.1	± 0.2

Fonte: (Bhavar, et al., 2014)

3.6 Direct Energy Deposition (DED)

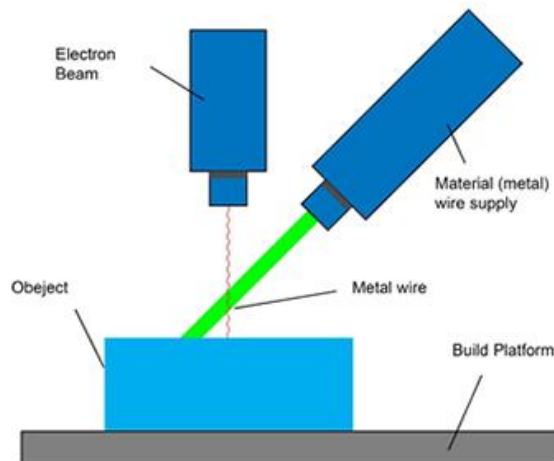


Figura 18 Processo de *Direct Energy Deposition*

Este é um processo geralmente utilizado para reparar ou adicionar material a partes já existentes sendo que a máquina é constituída por um *nozzle* que deposita material derretido na superfície específica, onde aquele solidifica.

⁷ Ra- Rugosidade Média

O *nozzle* tem a vantagem de se movimentar em várias direções o que faz com que o material possa ser depositado de qualquer ângulo, sendo este material posteriormente derretido pela ação de um laser ou feixe de elétrons.

Os materiais utilizados nesta tecnologia são basicamente polímeros, cerâmicas ou metais na forma de pó ou fio (Loughborough University).

Principais fabricantes:

- BeAM (FR);
- DMG Mori (GER);
- Hybrid Manufacturing Technologies (UK);
- INSSTEK (KR);
- MAZAK (JP);
- Optomec (US);
- Trumpf (GER);

Exemplo de equipamento de produção utilizado:

Tabela 7 Equipamento utilizado no processo de *Direct Energy Deposition*

Impressora	Área	Espessura da camada	Velocidade de impressão
Insstek MX3	1000 x 800 x 650 mm	0.089 - 0.203 mm	2 camadas/minuto

Na Tabela 7 é apresentada uma síntese dos vários tipos de processos descritos anteriormente bem como o volume de construção, fonte energética e equipamento de cada um respetivamente.

System	Process	Build volume (mm)	Energy source
Powder bed			
ARCAM (A2)(a)	EBM	200 × 200 × 350	7 kW electron beam
EOS (M280)(b)	DMLS	250 × 250 × 325	200-400 W Yb-fiber laser
Concept laser cusing (M3)(b)	SLM	300 × 350 × 300	200 W fiber laser
MTT (SLM 250)(b)	SLM	250 × 250 × 300	100-400 W Yb-fiber laser
Phenix system group (PXL)(c)	SLM	250 × 250 × 300	500 W fiber laser
Renishaw (AM 250)(d)	SLM	245 × 245 × 360	200 or 400 W laser
Realizer (SLM 250)(b)	SLM	250 × 250 × 220	100, 200, or 400 W laser
Matsuura (Lumex Advanced 25)(e)	SLM	250 × 250 diameter	400 W Yb fiber laser; hybrid additive/subtractive system
Powder feed			
Optomec (LENS 850-R)(f)	LENS	900 × 1500 × 900	1 or 2 kW IPG fiber laser
POM DMD (66R)(f)	DMD	3,200° × 3°, 670° × 360°	1-5 kW fiber diode or disk laser
Accufusion laser consolidation(g)	LC	1,000 × 1,000 × 1,000	Nd:YAG laser
Irepa laser (LF 6000)(c)	LD		Laser cladding
Trumpf(b)	LD	600 × 1,000 long	
Huffman (HC-205)(f)	LD		CO ₂ laser cladding
Wire feed			
Sciaky (NG1) EBFFF(f)	EBDM	762 × 483 × 508	>40 kW @ 60 kV welder
MER plasma transferred arc selected FFF(f)	PTAS FFF	610 × 610 × 5,182	Plasma transferred arc using two 350A DC power supplies
Honeywell ion fusion formation(f)	IFF		Plasma arc-based welding

Country of Manufacturer: (a) Sweden, (b) Germany, (c) France, (d) United Kingdom, (e) Japan, (f) United States, and (g) Canada

Figura 19 Vários tipos de equipamentos e procesos de FA

Fonte: <http://download.springer.com/static/pdf/342/>

Em 2014, 42 sistemas Arcam EBM foram vendidos enquanto que as empresas EOS, SLM Solutions e Concept Laser venderam um total de 210 sistemas SLM. O volume total de vendas a nível global aumentou em mais de 50% em 2015 (Murr & Johnson, 2016).

4- Materiais utilizados na FA

4.1 Generalidades

A relação entre o crescimento da indústria da fabricação aditiva e o tipo de materiais existentes no mercado é evidente na medida em que quantos mais materiais diferentes possuímos para produzir determinada peça maior irá ser o crescimento do mercado relativo à FA, daí que seja importante analisar os diversos tipos de materiais utilizados nos diversos processos subjacentes à FA.

Mediante o tipo de peça ou componente que se pretende produzir, é necessário não só escolher o processo mais eficiente mas também o tipo de material ideal para se obterem as propriedades finais pretendidas.

Hoje em dia, a indústria dos metais é o ramo em maior crescimento dentro da FA sendo estes utilizados, em forma de pó, na produção das várias partes relativas às indústrias médica, automóvel, aeroespacial, etc.

De um modo geral, utilizam-se principalmente aços inoxidáveis, ligas de alumínio, superligas de cobalto-crómio e de níquel, ligas de titânio e titânio puro, ligas de cobre e também metais preciosos (ouro, prata, platina).

Estes metais em pó podem variar bastante no que diz respeito à sua dimensão e à sua forma (esférica/irregular) daí que os fabricantes dos sistemas de FA trabalhem em conjunto com os fornecedores dos metais em pó de modo a assegurar a consistência e repetibilidade dos processos.

As empresas de fabricação de sistemas de fabricação Aditiva (EOS, *Concept Laser*, *Arcam*, etc) fornecem materiais em pó.

Para que um material em pó seja aprovado para a produção em FA é necessário que apresente certas características:

- forma esférica de modo a assegurar uma boa capacidade do material em pó fluir, bem como uma boa taxa de rugosidade e elevada massa específica;
- dimensão das partículas entre os 50 e 150 μm dependente do tipo de máquina, acabamento da superfície ou produtividade requerida;
- distribuição da dimensão das partículas de acordo com a aplicação e as propriedades;
- controlo da composição química (Leandri, 2015);

A distribuição das partículas é uma das propriedades mais importantes dos metais em pó que são utilizados na fabricação aditiva já que todos os fabricantes de sistemas de FA recomendam que se utilizem materiais em pó que são produzidos e fornecidos pelo próprio fabricante do equipamento de FA.

A capacidade com que o material em pó flui é um dos principais parâmetros a ter em conta e que é influenciado pela distribuição da dimensão das partículas, densidade do metal ou liga, forma das partículas e pela morfologia e humidade.

Um material em pó com partículas de dimensão inferior a 10 µm pode ser considerado como um material em pó muito fino que possui uma capacidade de fluir muito reduzida e que por vezes até nem flui, ao contrário de materiais em pó que apresentam partículas com maior dimensão e fluem bastante bem.

Os materiais em pó com partículas em forma esférica fluem melhor do que aqueles que apresentam partículas com forma irregular visto que aquelas não se juntam umas às outras.

A humidade do material em pó pode provocar uma união entre as partículas o que leva a que a capacidade de fluir seja inferior, logo é importante secar o material em pó antes de utilizar. Na figura 20 é possível verificar os diferentes tipos de formato das partículas.

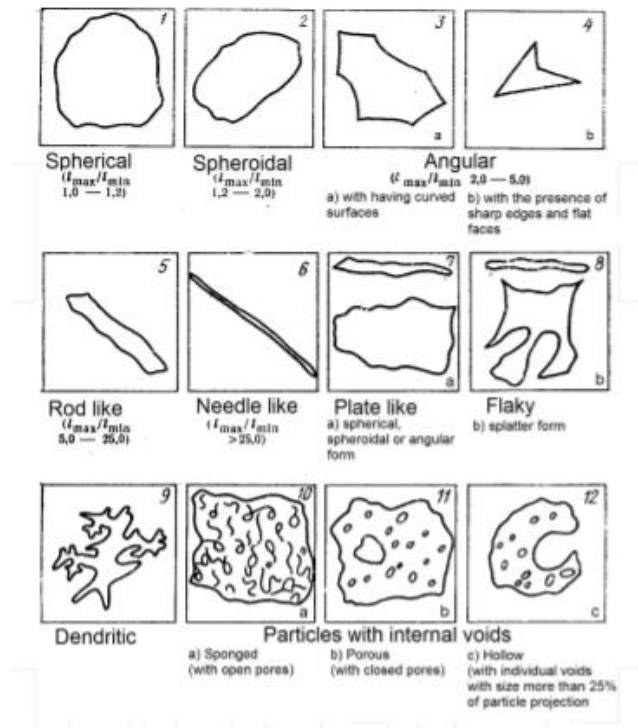


Figura 20 Formatos de partículas

Fonte: (Popovich & Sufiiarov, 2016)

A composição química do material em pó vai influenciar principalmente:

- Temperatura de fusão;
- Propriedades Mecânicas;
- Propriedades Térmicas;

(European Powder Metallurgy Association, 2015)

4.2 Materiais metálicos

4.2.1 Aços do tipo Ferramenta e *Maraging*

Aços do tipo Ferramenta referem-se a um conjunto de ligas de aço-carbono que são usadas para a fabricação de ferramentas.

Aços do tipo *Maraging* são ligas de ferro-níquel com adição de cobalto, molibdénio, titânio e alumínio. O termo *Maraging* deriva do processo através do qual as ligas são endurecidas pelo processo de transformação martensítico, seguindo-se o endurecimento por envelhecimento ou precipitação.

Exemplos de aços do tipo *Maraging*:

H13 é um tipo de aço capaz de suportar elevadas temperaturas por um período indeterminado de tempo.

Maraging 300 são conhecidos por combinarem alta resistência, tenacidade e estabilidade dimensional durante o processo de envelhecimento sendo a principal diferença para os outros tipos de aço o facto de serem endurecidos por uma reação metalúrgica que não envolve carbono mas sim a precipitação de outros componentes (Farinia Group).

4.2.2 Aços (outros tipos)

Aços inoxidáveis são ligas de aço com um teor mínimo de 10,5% de crómio distinguindo-as das ligas de aço normais, não sendo afetadas pela corrosão.

Principais exemplos:

- **316L**: metal com elevada resistência e resistente à corrosão que pode ser usada numa gama de temperaturas elevadas e também na zona das temperaturas criogénicas. É bastante utilizado na indústria aeroespacial mas também na médica e petrolífera.
- **15-5PH**: é um aço inoxidável *maraging* com elevada resistência, elevada tenacidade e resistente à corrosão que é endurecido pelo processo de precipitação de modo a obter uma dureza superior.
- **17-4PH**: é um aço inoxidável *maraging* que combina uma boa resistência à corrosão, resistência e tenacidade acima dos 315 °C, com excelente ductilidade no estado de processamento por laser (Farinia Group).

4.2.3 Titânio comercialmente puro e ligas de titânio

O titânio comercialmente puro (“Grade 1” e “Grade 2”) encontram-se disponíveis sob a forma de pó (titânio “Grade 2” é mais resistente que o “Grade 1”), sendo ambos resistentes à corrosão.

Exemplos de ligas de titânio:

- **Liga de titânio Ti6Al4V** (“Grade 5”) - no que diz respeito às ligas de titânio, esta é a principal. Combina uma elevada resistência e tenacidade com a capacidade de ser resistente à corrosão. Tem um baixo peso específico e é bio-compatível o que a torna ideal para muitas aplicações referentes à indústria aeroespacial e biomédica.
- **Liga de titânio Ti 6AL-4V ELI** (“Grade 23”) - é o nível mais elevado de pureza da liga Ti6Al4V.

4.2.4 Ligas de Alumínio

As ligas de alumínio em forma de pó são bastante utilizadas nos processos de *Laser Melting*, onde ocorre a fusão do material em pó, devido à pequena diferença entre as temperaturas de solidificação e fusão.

De salientar que as ligas de alumínio em comparação com o aço inoxidável têm um maior índice de reflexão da radiação laser bem como uma maior condutividade térmica.

De modo a aumentarmos a taxa de construção é necessária uma maior velocidade de varrimento (*scan*) o que resulta na utilização de um laser com maior potência (Dietrich, Wunderer, Huissel, & Zaeh, 2016).

Exemplos de ligas de alumínio:

- **AlSi12** - é um metal em pó utilizado na produção de partes com um baixo peso e boas propriedades térmicas. É muito utilizado na indústria aeronáutica e automóvel;
- **AlSi10Mg** - A combinação de silício e magnésio resulta num aumento da resistência e dureza desta liga de alumínio que é muito utilizada para a produção de partes com geometrias complexas, boas propriedades térmicas e baixo peso;

4.2.5 Ligas de Níquel

Exemplos das ligas níquel:

- **Inconel 625** - para processos em que a temperatura é muito elevada durante um elevado período de tempo o uso desta liga é limitado a 595 °C. É uma liga que é bastante utilizada em aplicações a baixa temperatura na indústria química.
- **Inconel 713** - oferece elevada resistência à fadiga térmica bem como elevada resistência à fratura a 927 °C sendo ideal para a produção das pás das turbinas dos motores das aeronaves.

- **Inconel 718** - é uma super liga com uma base de ferro e níquel com elevada resistência à corrosão e fratura a temperaturas até aos 650-700 °C. É muito aplicada nas turbinas dos motores das aeronaves tal como a Inconel 713.
- **Inconel 738** - possui uma elevada resistência à fratura em regimes de temperaturas elevadas bem como uma boa resistência à corrosão. Na indústria aeroespacial é utilizada visto que consegue aguentar a exposição a ambiente corrosivos, propícios nos motores das aeronaves, durante um longo período de tempo.
- **Hastelloy X** - é uma liga caracterizada por possuir uma elevada resistência, ser resistente à oxidação a elevadas temperaturas, sendo utilizada a temperaturas superiores a 1200 °C. Na indústria aeroespacial podemos encontrar esta liga nas turbinas, câmara de combustão, pós-combustão (*afterburners*) e ductos de transição correspondentes aos motores das aeronaves (Popovich & Sufiiarov, 2016).

4.2.6 Liga de Cobalto-Crómio

Esta classe de super-ligas é caracterizada pela elevada resistência, resistência à corrosão, comportamento não magnético e boa biocompatibilidade.

Co28Cr6Mo - é uma liga bastante utilizada na indústria médica nomeadamente nos implantes cirúrgicos (Popovich & Sufiiarov, 2016).

4.2.7 Liga de Cobre

CuSn10 - mais conhecida como bronze, possui excelentes propriedades térmicas e eléctricas, sendo uma boa opção para aplicações que requerem produção a elevada temperatura (Popovich & Sufiiarov, 2016).

4.3 Métodos de produção do *Material Base*

Segundo Dietrich et al (2016) a produção do material em pó necessário para a fabricação de peças utilizando a fabricação aditiva requer vários tipos de processos.

Geralmente o material é obtido pela via química, pela eletrólise, mecanicamente ou pelo processo de atomização, sendo que este último é o processo mais utilizado.

O processo de atomização pode ser descrito sucintamente como sendo um processo em que uma elevada quantidade de gás atomiza o metal líquido quando entra em contato com este, por sua vez, o metal líquido atomizado dá origem a gotas esféricas que solidificam, quando arrefecem abaixo da temperatura de fusão. Na figura 21 é possível analisar o processo de atomização.

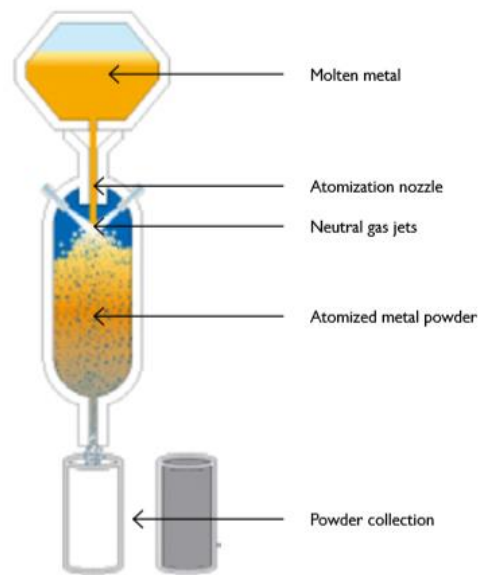


Figura 21 Processo de atomização

Fonte: (European Powder Metallurgy Association, 2015)

Nos materiais reativos, ou seja, metais com elevada tendência em doar elétrons, como por exemplo, o alumínio, a atomização é realizada numa atmosfera protegida, sendo que em todos os processos de produção de alumínio em pó é utilizado um gás inerte para preservar a forma esférica das partículas.

Este gás inerte é utilizado visto que caso o processo de atomização fosse realizado com ar, ocorreria uma oxidação parcial do material líquido levando a que o metal líquido não obtivesse uma forma esférica.

Atualmente, os métodos utilizados para a produção do material em pó e a qualidade do material estão em constante desenvolvimento e estudo visto que determinados parâmetros influenciam o processo de FA e conseqüentemente a qualidade da parte produzida.

Segundo a *European Powder Metallurgy Association* (2015), a qualidade do metal em pó para além de influenciar as propriedades mecânicas das peças produzidas influencia também a produção de componentes sem defeitos. De modo a obterem-se peças e componentes com elevada resistência e com um bom comportamento à fadiga, é importante produzir partes com elevada densidade e com um excelente acabamento superficial.

Desta forma, é importante considerar que nos processos a laser, a densidade energética é um fator crucial visto que para fundir as partículas do material em pó é necessária uma determinada densidade energética que assegure uma junção correta do material entre as várias camadas e que evite falhas de material fundido e porosidade.

A utilização de energia em excesso pode provocar a vaporização do material, dando origem a defeitos e redução da densidade do material.

5- A indústria aeronáutica em Portugal

O âmbito deste capítulo é de apresentar o estado atual da indústria aeronáutica no país, ou seja, além de enunciar as principais organizações do mercado nacional, apresentar dados acerca do que atualmente se produz e quais os principais objetivos para o futuro, com foque na maneira com que as empresas atualmente investem nas novas tecnologias, como é o caso da fabricação aditiva.

5.1 Setor aeronáutico nacional

A indústria aeronáutica em Portugal foi uma indústria que durante vários anos dependeu dos orçamentos governamentais para a área da defesa, sendo esta a principal área de interesse. Nos últimos anos têm-se assistido a mudanças nesta ideia de pensar, tendo-se adotado uma perspetiva mais comercial do tipo cliente-fornecedor resultando principalmente da redução dos orçamentos disponíveis para a defesa, em virtude de alterações geopolíticas e também da regulação efetiva da Organização Mundial do Comércio (Filipe & Guedes, 2004).

Várias parcerias, entre os principais fabricantes, foram permitidas pelo governo de modo a estimular o mercado aeronáutico nacional através da obtenção de maior valor, partilha do custo de desenvolvimento e do risco a ele inerente, que de outra forma seria impossível caso os custos estivessem concentrados numa só organização.

Desta forma tem-se vindo a assistir a uma procura constante de novas parcerias, tanto a nível nacional como internacional, para o desenvolvimento de novas tecnologias e fabricação de novos aviões e componentes (Filipe & Guedes, 2004).

Uma vez que se trata de uma indústria que requer constantes investimentos, é necessária a existência de ajudas e subsídios para o seu desenvolvimento, de origem interna ou externa ao país. Em Portugal, a maioria das empresas existentes pertence ao grupo das PME, sendo o seu mercado caracterizado como pequeno e de baixa dimensão, daí que as parcerias com outras empresas permitem acrescentar maior valor (Santos, 2013).

Atualmente, existem vários fatores benéficos da existência destas parcerias, entre os quais, o acesso a tecnologias especializadas, acesso a empresas mais eficientes, acordos de *offset* (contrapartidas) e redução de barreiras e de riscos.

Os fabricantes de aviões e componentes pretendem obter acesso às tecnologias especializadas de outras empresas já que é impossível um fabricante dominar todas as áreas de conhecimento associadas ao seu produto, sendo a agregação de inovações e das tecnologias mais avançadas só possíveis por intermédio de empresas especializadas.

O acesso a empresas mais eficientes é um fator importante já que o facto do fornecedor dominar uma determinada tecnologia ou competência pode trazer vantagens ao fabricante, nomeadamente a obtenção de menores custos.

Os acordos de *offset*, quando existentes⁸, são definidos como sendo uma prática usada em transações de exportação nas quais o comprador exige que o fornecedor do produto ou serviço para a defesa disponibilize também condições industriais que permitam ao estado adquirente vender produtos e/ou serviços desejavelmente com valor semelhante ao valor das aquisições.

A redução de barreiras e riscos é um fator que está sempre presente em qualquer organização na medida em que o risco do lançamento de determinado produto tem vindo a ser compartilhado com outras empresas bem como as recompensas (Guerra, 2011).

5.2 Organização da indústria aeronáutica - *supply chain*

Na figura 22 é possível verificar a típica organização de uma cadeia de abastecimento presente na indústria aeronáutica.

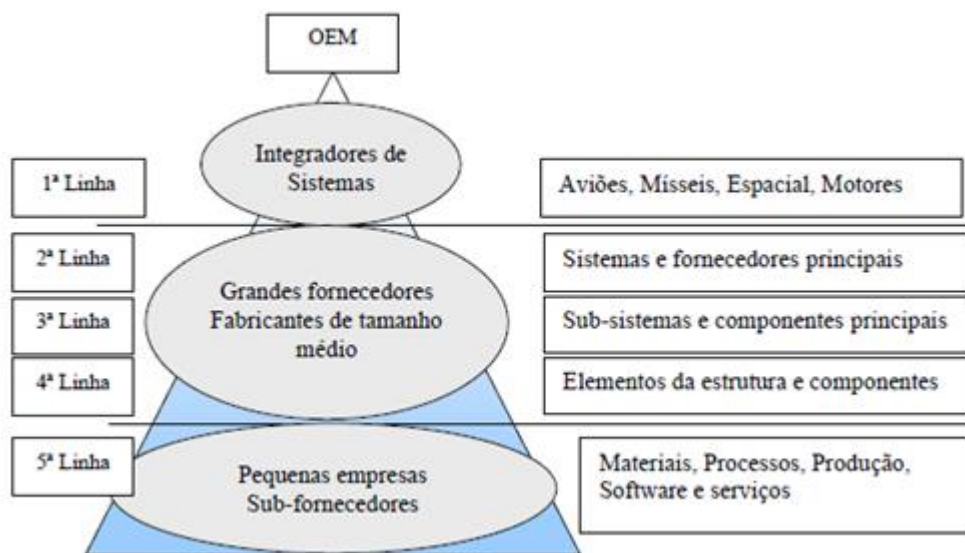


Figura 22 Organização da cadeia de abastecimento na indústria aeronáutica

Fonte: (Filipe & Guedes, 2004)

Através da análise da Figura 22 é possível verificar a existência de cinco linhas de separação sendo que no topo se encontram as OEM, ou seja, os responsáveis máximos pelo desenvolvimento do produto e pela implementação da rede de fornecimento. Os fornecedores

⁸ Em Portugal a obrigação legal de offsets nas aquisições de defesa já não é existente devido a imposições da legislação da União Europeia. Todavia, ainda subsistem muitas atividades industriais em Portugal que se realizam a coberto de antigas aquisições de defesa que incluíam contrapartidas (e.g, fabricação na OGMA de nacelle par C130J).

de 1ª linha são, sobretudo, grandes empresas a nível mundial, especialistas em determinado mercado, como é o caso dos fabricantes de aviões, motores, foguetes, satélites e mísseis (e.g. *Airbus, Boeing, Bombardier*).

Os fornecedores de 2ª linha são constituídos por empresas com especialização em sistemas complexos, com desenvolvimento próprio (e.g. Sistemas Hidráulicos e Elétricos). Os de 3ª linha são fornecedores que produzem subsistemas e componentes principais que são posteriormente entregues aos fornecedores de 2ª linha e integrados nos diversos componentes que estejam a ser produzidos.

Apesar da diferença entre a 3ª e 4ª linha ser bastante reduzida, na 4ª linha estão presentes fornecedores de elementos estruturais e componentes que em regra geral também produzem sub-sistemas e componentes principais. Na 5ª linha estão presentes as empresas pertencentes ao grupo das PME cuja função incide em auxílio de produção (e.g. maquinaria, tratamentos superficiais) (Filipe & Guedes, 2004).

A evolução da organização da cadeia logística na indústria aeronáutica, representada na Figura 23, permite-nos verificar que as OEM são cada vez mais os responsáveis pelas plataformas de integração, recorrendo aos fornecedores de sistemas e subsistemas, resultando no aparecimento de fornecedores integradores de sistemas e de maior valor acrescentado com impacto na indústria aeronáutica.

A integração de módulos e peças finais passa a ser alvo dos fornecedores de 1ª linha que se desenvolvem cada vez mais. Os fornecedores de serviços e fabricação por desenho são cada vez menos com o passar do tempo.

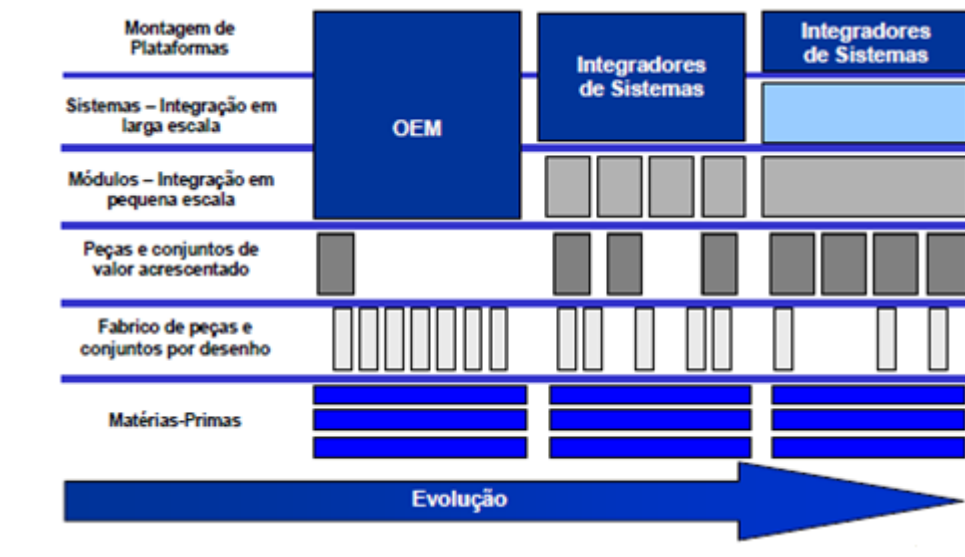


Figura 23 Evolução da organização da cadeia logística na indústria aeronáutica

Fonte: (Filipe & Guedes, 2004)

Segundo Santos (2013), a indústria aeronáutica é um setor bastante instável que depende bastante do contexto económico e geopolítico e que requer a necessidade de elevados investimentos, longos períodos de investigação e desenvolvimento, em que o retorno

do capital investido é demorado e os riscos elevados. Na figura 24 é possível verificar a variação do fluxo financeiro (custos não-recorrentes e recorrentes⁹) no ciclo de vida de um avião.

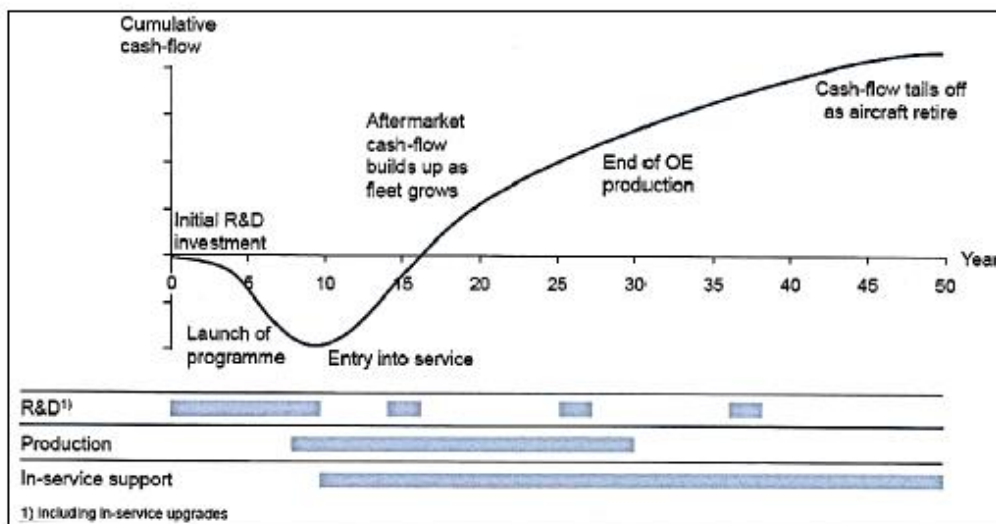


Figura 24 Fluxo financeiro no ciclo de vida de um avião

Fonte: (Santos, 2013)

Esta indústria depende muito do progresso tecnológico e do apoio governamental de modo a potenciar projetos de I&D empresarial que são a base para a produção de componentes inovadores que geram o crescimento da indústria (Santos, 2013).

5.3 Sociedades não financeiras ativas

No final de 2015, aquando o último estudo realizado, Portugal registava 1,163,082 sociedades não financeiras ativas, ou seja, empresas que apresentam como principal função a produção de bens e serviços não financeiros, podendo ser empresas individuais ou sociedades (INE, 2016). Quanto à distribuição das sociedades por setor de atividade, o comércio conta com 19,7% das sociedades ativas, Indústria com 6%, Alojamento e Restauração com 7,5%, Construção e Atividades Imobiliárias com 9,5% e outros serviços com 43%, como é possível verificar na figura 25.

⁹ Terminologia comum em aeronáutica, em que os custos não-recorrentes dizem respeito (fundamentalmente) às atividades de projeto; e recorrentes à produção série.

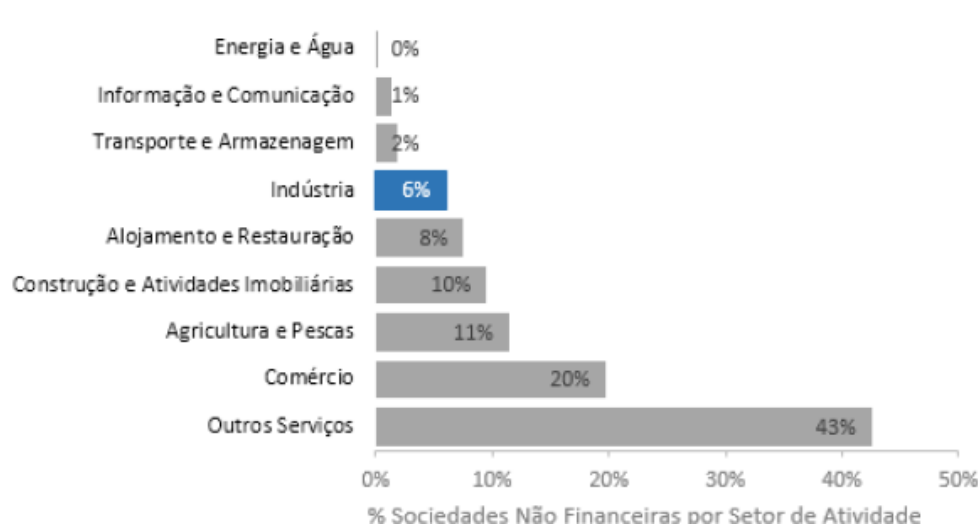


Figura 25 Distribuição das Sociedades Não Financeiras por setor de atividade

Fonte: (dos Santos, 2016)

Segundo o Decreto-Lei nº 372/2007 a dimensão de uma empresa é a seguinte:

- **Microempresa:** pelo menos 10 efetivos e volume de negócios ou balanço total inferior a 2 Milhões de euros;
- **Pequena empresa:** mais de 11 e menos de 50 efetivos e um volume de negócios ou balanço inferior a 10 Milhões de euros;
- **Média empresa:** mais de 51 e menos de 250 efetivos e um volume de negócios inferior a 50 milhões de euros ou um balanço inferior a 43 milhões de euros;
- **Grande empresa:** possui mais de 250 efetivos e um volume de negócios superior a 50 milhões de euros ou um balanço total superior a 43 milhões de euros (dos Santos, 2016).

Na figura 26 é possível analisar a distribuição das empresas do setor industrial nacional, sendo este constituído principalmente pelas pequenas e médias empresas (27,7%) e pelas microempresas (71,5%).

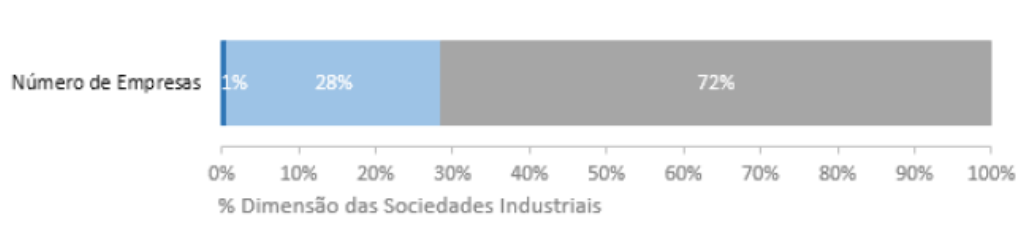


Figura 26 Número de empresas por dimensão da sociedade industrial

Fonte: (dos Santos, 2016)

5.4 Constituição do setor aeronáutico em Portugal

Atualmente, em Portugal, a indústria aeronáutica encontra-se representada por três grandes empresas sendo elas a OGMA - Indústria Aeronáutica de Portugal, a TAP - Transportadora Aérea Portuguesa e a Embraer. A TAP é composta por três unidades, TAP Transporte Aéreo, TAP - Manutenção e Engenharia e TAP - Serviços. As atividades da OGMA são do tipo MRO (*Maintenace Repair and Operations*), possuindo capacidades na manutenção de aeronaves, manutenção de motores e componentes, modificações, suporte de engenharia, sustentação de frotas e serviços de gestão de aeronavegabilidade e construção de estruturas aeronáuticas. A Embraer possui 65% do capital da OGMA e duas fábricas em Portugal, uma para fabricação de estruturas em compósitos e outra com recurso a materiais metálicos (Santos, 2013).

Além destas empresas de maior dimensão, o mercado aeronáutico é também constituído por um elevado número de pequenas e médias empresas, algumas delas subsidiárias de grupos internacionais, cuja principal área de trabalho é a engenharia, manutenção, reparação, desenvolvimento de tecnologias de informação, fabrico de componentes, estruturas e moldes. Segundo Reis (2011) existiam durante esse ano, 195 empresas aeronáuticas em Portugal, na sua maioria PME.

Por outro lado, o setor aeronáutico, na vertente da Defesa, encontra-se representado pela Força Aérea e pela Marinha. As várias universidades do país, Instituto Superior Técnico e Universidade da Beira Interior, e outras instituições, como é o caso do CEiiA, representam um papel que se foca principalmente nos projetos de I&D (Santos, 2013).

Na figura 27 é possível verificar que o mercado aeronáutico em Portugal encontra-se localizado principalmente no litoral do país, sendo as regiões de Lisboa e Porto as principais áreas onde as empresas se encontram.

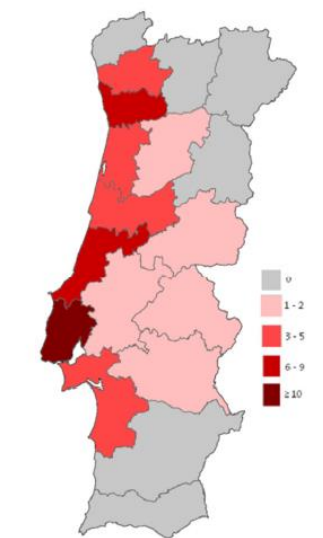


Figura 27 Distribuição das empresas aeronáuticas em Portugal

Fonte: (Reis, 2011)

5.5 Influência económica do setor aeronáutico em Portugal

Segundo Felizardo & Cunha (2007), de modo a entender melhor o papel que o setor aeronáutico representa no mercado nacional é necessário apresentar dados relativos a diversos fatores económicos e de que forma estes têm vindo a evoluir ao longo dos anos. Na figura 28 é possível verificar a influência que as dez maiores empresas aeronáuticas têm no mercado ao nível de volume de negócios, taxa de crescimento, emprego e investimento em I&D. É efetuada uma comparação com as médias dos países que pertencem à ASD (*Aerospace and Defense Industries Association of Europe*).



Figura 28 Dados relativos ao setor aeronáutico e influência no mercado nacional

Fonte: (Felizardo & da Cunha, 2007)

Após interpretação da figura 28 é fácil constatar que, em comparação com os outros países europeus pertencentes à ASD, todos os parâmetros apresentados estão abaixo da média, no entanto, o crescimento da indústria aeronáutica em Portugal tem vindo a aumentar ao longo dos anos.¹⁰

¹⁰ VN- Valor nominal

5.6 Investimento em I&D

O investimento em projetos de I&D é fundamental para manter a sustentabilidade e o desenvolvimento de um setor aeronáutico, quer a nível nacional como internacional. Cada vez mais as empresas, se encontram a apostar neste tipo de projetos como é possível verificar na Figura 29. Na linha cinzenta é possível verificar a variação da aposta em I&D por parte dos países da União Europeia enquanto que na linha vermelha e amarela, visível na Figura 29, (fontes diferentes de recolha de dados) a aposta dos Estados Unidos sendo que após 2006 não há dados disponíveis, no entanto no contexto de uma crise financeira é espectável que os valores decresçam. Na figura 29 é possível verificar o contínuo crescimento no investimento em I&D pelos EUA e pelos países da União Europeia.

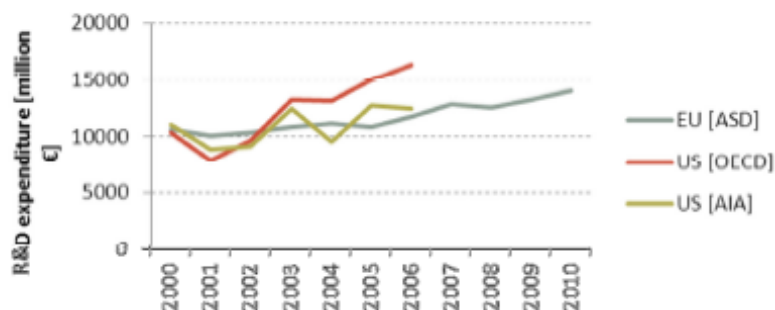


Figura 29 Comparação do investimento em I&D entre EUA e UE

Fonte: (Reis, 2011)

No entanto, como se verifica na figura 30, Portugal encontra-se a sair de um período de quebra, desde 2010, no que diz respeito ao investimento em projetos de I&D. As despesas com investigação e desenvolvimento foram de 1,27% do PIB, sendo um dos países que menos gastam com I&D. O máximo recorde foi obtido em 2009 com 1,64% do PIB sendo que a despesa em I&D aumentou entre 2015 e 2016 em 114 milhões de euros perfazendo um investimento total de 1162 milhões em 2016 (Silva, 2017).

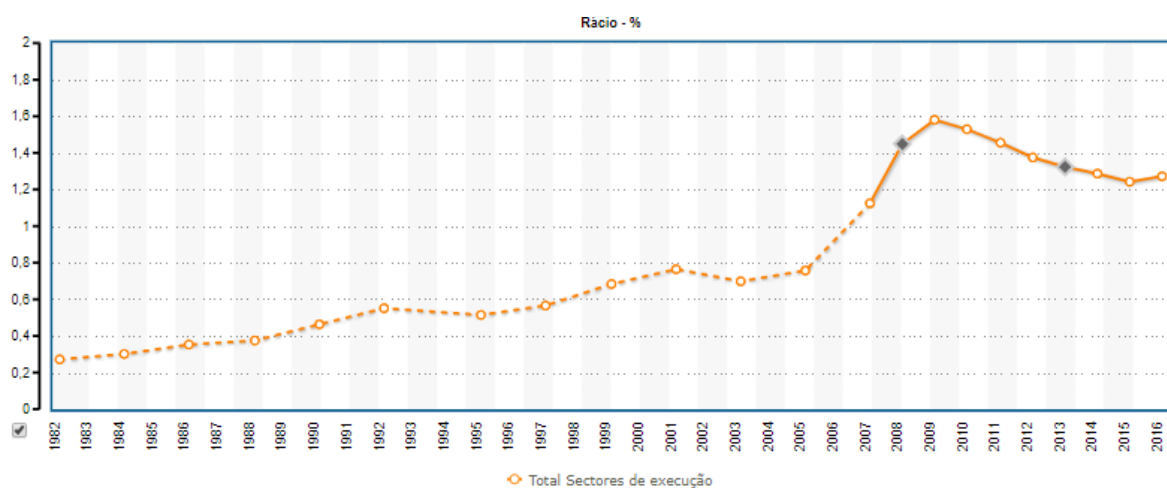


Figura 30 Despesas de I&D em Portugal (% PIB) em função do tempo

Fonte: INE | BP, DGEEC/MEd - MCTES, PORDATA

5.7 “Cluster” aeronáutico nacional

O termo “cluster” pode ser definido como sendo uma concentração geográfica de empresas e instituições ligadas entre si e que operam num mesmo segmento económico. De acordo com Porter (1993) o efeito de *clusterização* é mais eficaz quando as indústrias coexistem na mesma área geográfica de modo a que exista um intercâmbio de ideias, conhecimento, informação e volume de negócio. Todos estes fatores juntos dão origem ao desenvolvimento das empresas, tornando-se mais competitivas e com um papel ativo nas cadeias globais de abastecimento que se traduz num efeito direto no mercado económico nacional.

Segundo Porter (1993), a competitividade de uma nação é proporcional à capacidade de inovação que produz sendo que esta capacidade depende de três fatores:

- infraestrutura de inovação comum;
- sustentabilidade de condições para a existência de clusters;
- força das ligações entre as indústrias interrelacionadas;

Vários países possuem políticas que incentivam a aposta na *clusterização* na indústria aeronáutica na tentativa de maximizarem o nível tecnológico e a criação de novos produtos com valor acrescentado para um desenvolvimento económico mais sustentado (Filipe & Guedes, 2004).

Segundo Porter (1993), a dinâmica dos “clusters” depende de fatores tais como:

- concorrência local entre as empresas;
- fornecimento de equipamentos e serviços;
- capital humano;
- instituições de I&D;

Segundo Filipe & Guedes (2004), os “clusters” aeronáuticos são agregados de empresas, dominados pelos integradores OEM, ou por empresas de 1º nível, em que a concorrência e a procura não são locais. Como na indústria aeronáutica a fabricação de novos produtos e componentes, as empresas tendem a ampliar as suas instalações, a construir fábricas novas ou a absorver instalações de outras empresas nessa região, daí que os “cluster” aeronáuticos tenham elevada durabilidade, quando se encontram consolidados, o que constitui uma vantagem para Portugal.

Atualmente o “cluster” aeronáutico português é representado pela AED Portugal, englobando as indústrias pertencentes aos ramos da aeronáutica, espaço e defesa e responsável por promover e desenvolver o setor aeronáutico em Portugal. Os membros constituintes da AED são a PEMAS (Associação para a Valorização e Promoção da Oferta das Empresas Nacionais para o Setor Aeronáutico), PROESPAÇO E DANOTEC.

A partir das sinergias criadas entre as competências dos seus associados, os objetivos da AED são claros:

- consolidar uma estratégia comum para o setor;
- promover a *interclusterização* e gerar parcerias;
- reforçar a internacionalização dos setores;
- capacitar as empresas e os empreendedores;
- divulgar o cluster junto dos *stakeholders*;
- obter o *GOLD LABEL* do *European Secretariat of Cluster Analysis* até 2020.

Segundo o vice-presidente do AED e o presidente da PEMAS, o “cluster” nacional da aeronáutica, espaço e defesa representa aproximadamente 1% do Produto Interno Bruto (PIB) português, reunindo mais de 60 entidades e 18500 empregos responsáveis por uma faturação total superior a 1700 milhões de euros, dos quais 80% correspondem a exportações. É esperado que nos próximos 10 anos, o setor aeronáutico, represente cerca de 2% do PIB. Na figura 31 verificam-se as diversas áreas que a indústria aeronáutica nacional abrange.

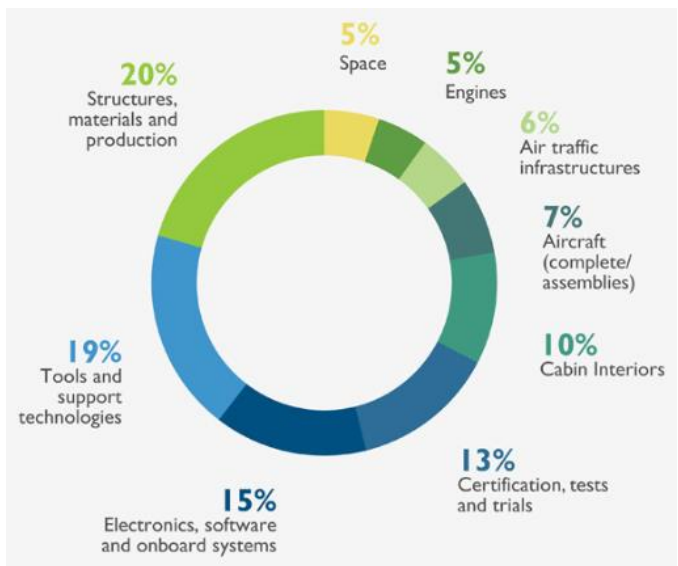


Figura 31 Ramos da Indústria Aeronáutica Portuguesa

Fonte: AED Portugal

O desenvolvimento de tecnologias de suporte e a fabricação de estruturas, material e produção representam as principais áreas da indústria aeronáutica em Portugal.

Nas figuras 32, 33 e 34 são apresentados dados relativos ao número de empresas constituintes do “cluster”, percentagem de exportações, retorno e distribuição do emprego que nos permitem ter uma noção mais realista da dinâmica que a indústria aeronáutica cria no país.



Figura 32 Constituição do “cluster” nacional e percentagem de exportações

Fonte: AED Portugal

Como anteriormente foi referido, o cluster aeronáutico é constituído por atualmente por 68 empresas, e pela figura 32, é fornecida a informação de que todos os anos se formam cerca de 120 engenheiros no ramo aeronáutico em Portugal.

Exemplos de membros pertencentes ao cluster aeronáutico nacional:

- Activespace;
- Edisoft;
- Altran;
- Thales;
- Tekever;
- Lauak;
- Lusospace;
- Indra;
- Activespace;
- Embraer;
- Tekever;
- Edisoft;

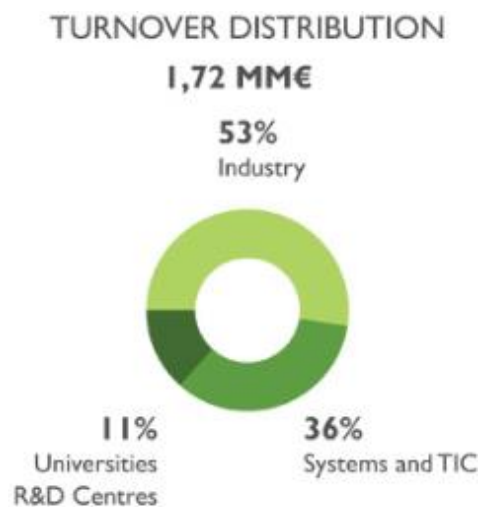


Figura 33 Retorno da indústria

Fonte: AED Portugal

Da figura 33 conclui-se que a maior percentagem de retorno provém da parte indústria sendo que a menor percentagem provém das universidades e dos centros de I&D, sendo espectável, que devido à aposta nos projetos de I&D, esta percentagem aumente ao longo dos próximos anos.

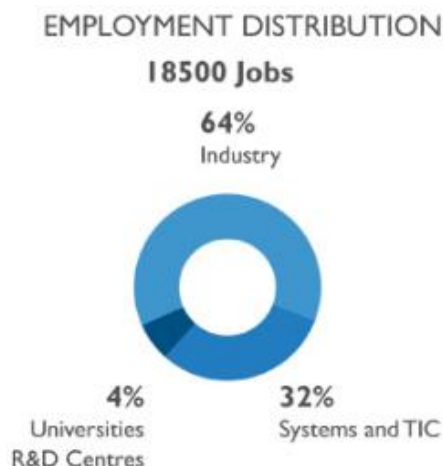


Figura 34 Distribuição do Emprego

Fonte: AED Portugal

O “cluster” aeronáutico constituído principalmente por empresas aeronáuticas, grande parte delas PME, é responsável pela criação de cerca de 18500 postos de trabalho.

5.8 Fabricação Aditiva em Portugal

O facto da impressão 3D ser uma tecnologia emergente e ter previsões que apontam para um elevado grau de desenvolvimento nos próximos anos faz com que a aposta neste tipo de tecnologia possa constituir uma opção por parte das empresas nacionais.

Segundo o CEiiA, a aposta nesta tecnologia requer um estudo prévio por parte das empresas visto que tratando-se de uma tecnologia que está em constante evolução e sendo bastante dispendiosa, é necessário que a empresa que pretenda adotar tal tecnologia saiba exatamente que está a fazer uma boa aposta pois os riscos associados são bastante elevados. Estes riscos associados à tecnologia, são referentes ao facto de que é necessário garantir que o equipamento que a empresa pretende adquirir consegue realizar a produção das peças com a qualidade desejada visto que se tal não for um dado garantido, não compensa realizar um investimento de tal dimensão em algo que não irá acrescentar valor à empresa.

Atualmente as empresas encontram-se principalmente a desenvolver a tecnologia e não a produzir peças visto que não é possível produzir componentes com a qualidade desejada. No setor aeronáutico são bastante poucas as empresas que apostam nesta tecnologia visto ser

bastante dispendiosa, sendo o CEiiA das únicas que através de um protocolo com a Adira¹¹ se encontra a desenvolver a tecnologia.

No estudo realizado por Dos Santos (2016) ao mercado nacional, que incidiu num inquérito a 41 empresas das mais diversas indústrias, tinha como objetivo analisar em que ponto a fabricação aditiva se encontra presente na indústria portuguesa e de que forma se pretende que esta constitua opção futuramente para a produção de peça e componentes.

As empresas analisada eram pertencentes às indústrias de fabricação de artigos de borracha e matérias plásticas, equipamentos elétricos e de ótica, máquinas e equipamentos, moldes metálicos, veículos automóveis e de investigação e desenvolvimento.

Das empresas inquiridas, apenas 19% utilizavam atualmente processos de fabricação aditiva sendo que 61% não tencionam vir a adotar a tecnologia como é possível verificar na figura seguinte.

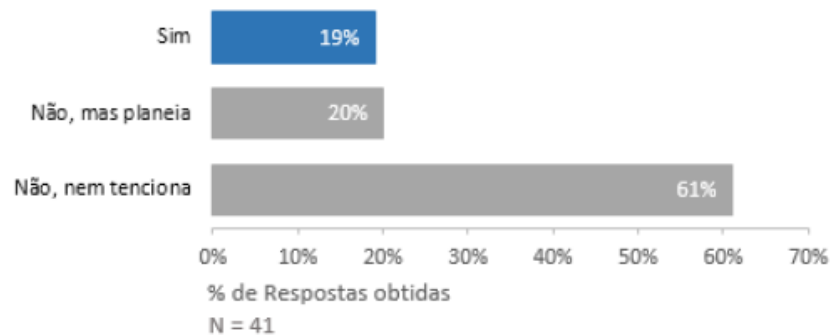


Figura 35 Resultado obtido da questão “A sua organização usa atualmente a impressão 3D?”

Fonte: (dos Santos, 2016)

Estes números são representativos daquilo que é a atual maneira de pensar por parte das empresas em relação à fabricação aditiva e que se reflete na dimensão reduzida que esta apresenta no mercado nacional.

Da figura 36, onde são apresentados dados relativos a cada setor industrial que fez parte do estudo, salienta-se um fator relevante no que diz respeito ao setor da investigação e desenvolvimento, em que 100% da amostra utiliza a impressão 3D.

¹¹ Adira é um dos líderes mundiais na fabricação de máquinas para chapa. A empresa possui Quinadoras/ Dobradeiras hidráulicas, elétricas e híbridas, máquinas de corte Laser, Guilhotinas, células robotizadas e sistemas automáticos de corte e quinagem/dobra de chapa.

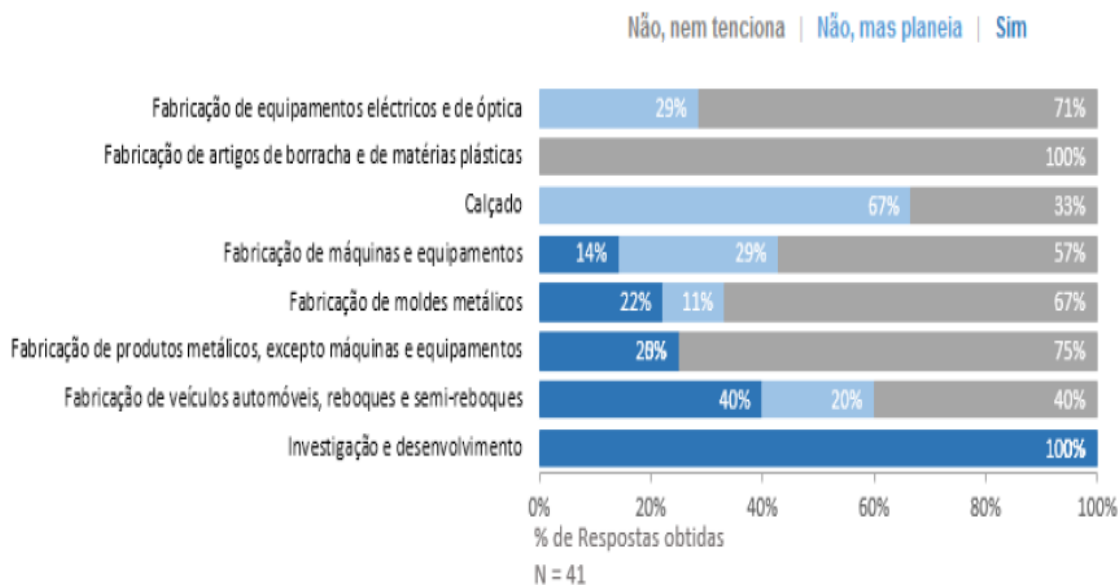


Figura 36 Segmentação por setor industrial

Fonte: (dos Santos, 2016)

Também foram recolhidos dados sobre o período de tempo que cada organização começou a utilizar a tecnologia de impressão 3D, como é possível verificar na figura 37, onde a grande maioria (75%) já utiliza há mais de 2 anos.

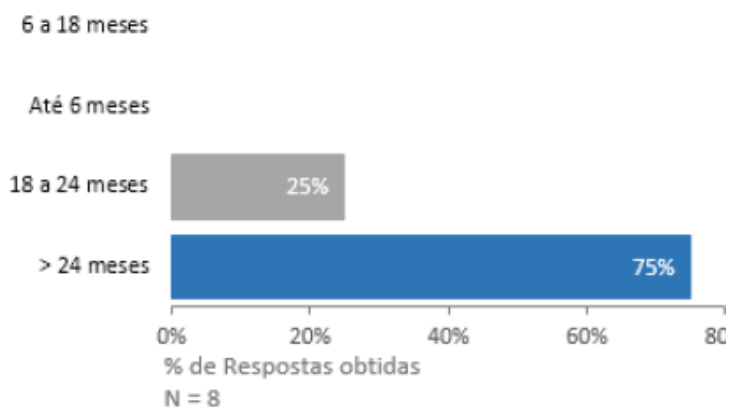


Figura 37 Tempo que a empresa recorre a processos de fabricação aditiva

Fonte: (dos Santos, 2016)

No estudo realizado por Santos (2016) avaliou-se também o grau de investimento por parte de cada empresa (8 empresas) que recorria à fabricação aditiva face ao orçamento anual do departamento, como se verifica na figura 38. Foram dadas no questionário 4 opções (5%, 5% a 10%, 10% a 15% e mais de 15%).

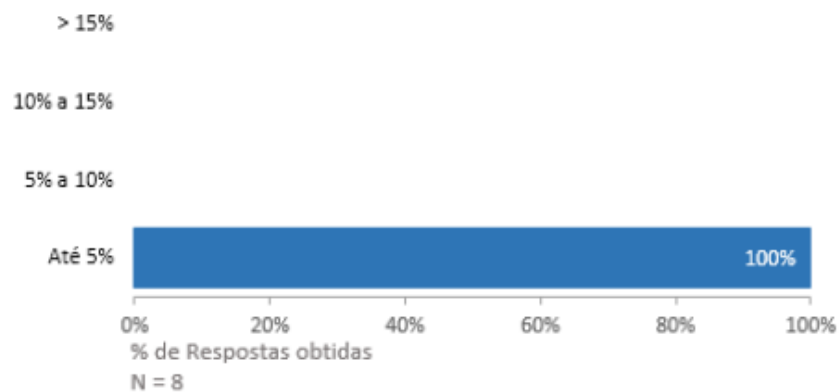


Figura 38 Percentagem do orçamento anual aplicado na impressão 3D

Fonte: (dos Santos, 2016)

A finalidade das peças produzidas recorrendo à fabricação aditiva foi também estudada, verificando-se que dentro das 8 empresas, a prototipagem é a principal finalidade como se visualiza na figura 39.

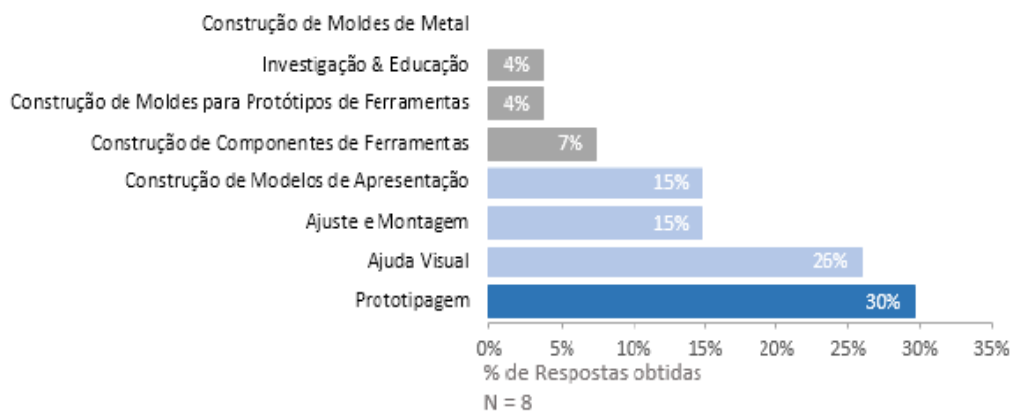


Figura 39 Finalidades das peças fabricadas recorrendo à fabricação aditiva

Fonte: (dos Santos, 2016)

De entre todas as vantagens que a fabricação oferece em relação à fabricação tradicional (descritas anteriormente no Capítulo 2), é importante perceber o que leva determinada empresa a apostar nesta tecnologia, sendo esta uma aposta com alto risco associado ao facto de ser uma tecnologia dispendiosa. Das 8 empresas que compreendem a amostra do estudo realizado por Santos (2016), apesar das empresas apostarem na tecnologia de modo a baixar os custos associados à produção e por ser uma tecnologia com processos

inovadores, o principal fator que leva à adoção da fabricação aditiva é a prototipagem como se pode ver na figura seguinte.

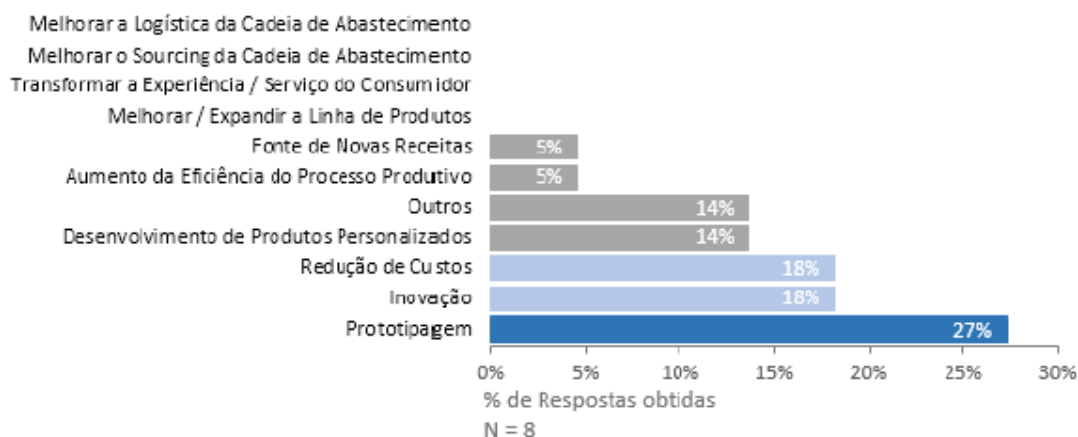


Figura 40 Fatores motivadores da adoção da fabricação aditiva

Fonte: (dos Santos, 2016)

No entanto, como nem tudo são vantagens, a fabricação aditiva apresenta diversas desvantagens que ao serem estudadas previamente pelas organizações se tornam, por vezes, fatores importantes numa tomada de decisão acerca de apostar ou não nesta tecnologia. Na figura 41 são reveladas as principais dificuldades para as empresas que adotaram esta tecnologia.

Facilmente se constata que a fraca capacidade e consistência das impressoras e por consequência a fabricação de peças com uma qualidade abaixo do desejado e inconsistentes são a grande desvantagem atualmente. O CEiiA referiu esta desvantagem daí que se encontre em parceria com a Adira a desenvolver a tecnologia de modo a melhorar a consistência e a qualidade das peças produzidas. A qualidade refere-se às propriedades físicas e químicas presentes na peça produzida, devido à inconsistência das impressoras atuais, que não são iguais às propriedades desejadas quando se dá início ao projeto.

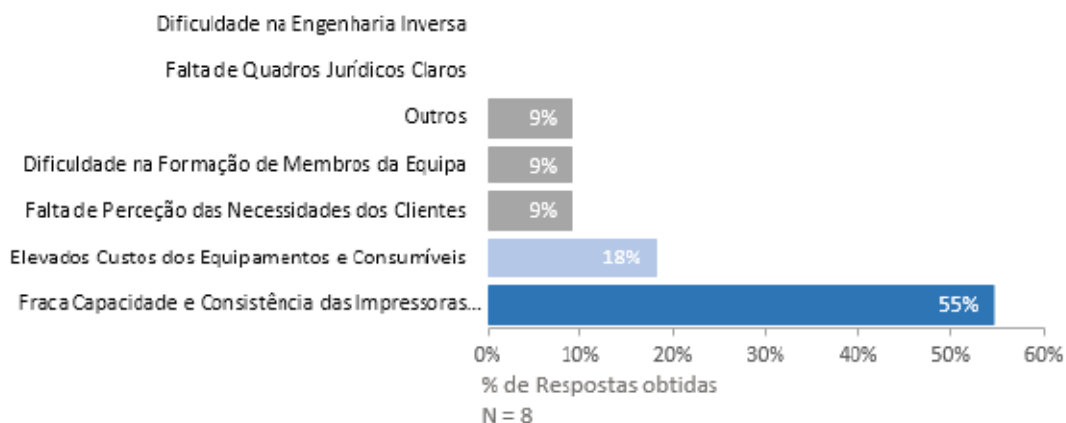


Figura 41 Principais dificuldades das empresas que adotaram a fabricação aditiva

Fonte: (dos Santos, 2016)

O estudo realizado por Santos (2016), além de ser importante no sentido que nos apresentada dados relativos às empresas nacionais que atualmente utilizam a fabricação aditiva, abrange também a intenção das empresas adotar a tecnologia em longo prazo. Como se pode ver na figura 42, as empresas pretendem recorrer à fabricação aditiva nos próximos anos.

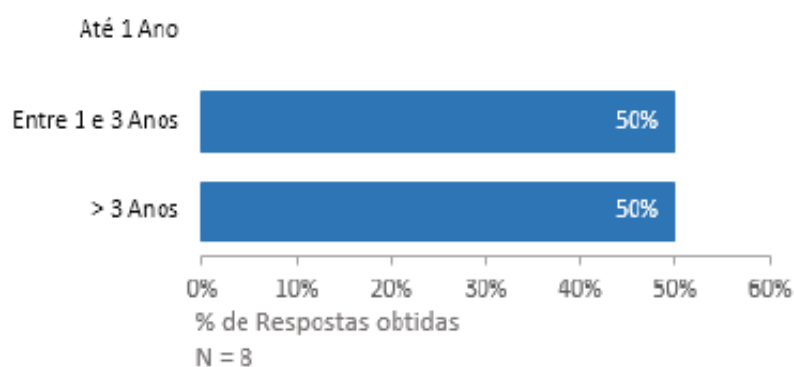


Figura 42 Horizonte temporal para a adoção da fabricação aditiva

Fonte: (dos Santos, 2016)

Para as empresas que pretendem recorrer a esta tecnologia futuramente, é importante saber quais as dificuldades que antecipam visto que pode constituir um fator para a não adoção da tecnologia de imediato. Da figura 43 constata-se que os elevados custos dos equipamentos e matéria prima são os factores que preocupam mais as empresas bem como a inconsistência e fraca qualidade das impressoras disponíveis.

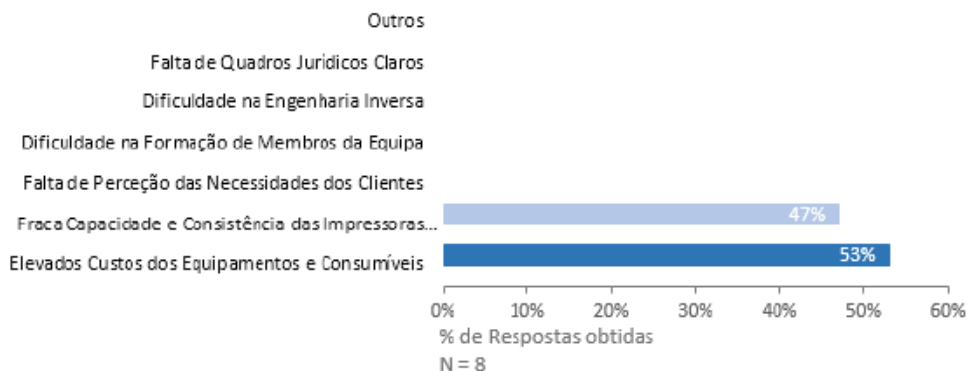


Figura 43 Dificuldades antecipadas pelas empresas que pretendem adotar a FA

Fonte: (dos Santos, 2016)

Visto que a amostra das empresas que adotam a fabricação aditiva é de apenas 8, é importante saber que fatores fazem com que as restantes empresas não adotem a tecnologia de impressão 3D.

Como se vê na figura 44, as opiniões são diversas, no entanto, os elevados custos dos equipamentos e consumíveis e o facto da tecnologia não ser aplicável aos processos produtivos atuais faz com que as empresas não optem pela fabricação aditiva.

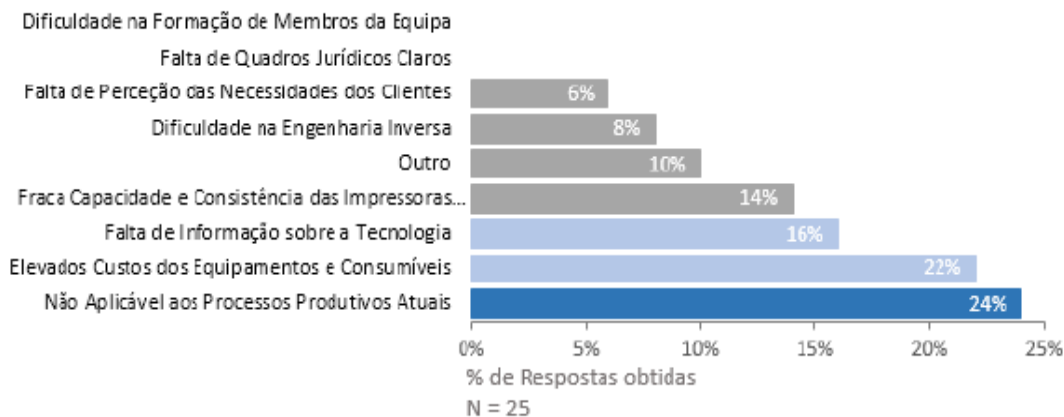


Figura 44 Factores que levam à não adoção da fabricação aditiva

Fonte: (dos Santos, 2016)

5.8.1 Organizações habilitadas com certificado POA em Portugal

Portugal atualmente apresenta apenas 2 empresas com certificado POA, influenciando bastante o desenvolvimento que a tecnologia de fabricação aditiva tem no setor aeronáutico. Este certificado aprova que determinada empresa está apta para fabricar componentes aeronáuticos caso cumpra todos os parâmetros presentes nas legislações da EASA, como é possível verificar no anexo presente no final da dissertação. Este número diz um pouco daquilo que é a realidade do setor aeronáutico português em termos de projeto de componentes aeronáuticos.

Empresas aeronáuticas portuguesas com certificado POA:

- OGMA - Indústria Aeronáutica de Portugal, SA;
- Karmann Ghia de Portugal - Indústria de Confecção de Capas, Lda;

Exemplo do número de organizações com certificado POA nos outros países da União Europeia:

- Estónia (1)
- Eslováquia, Eslovénia e Portugal (2)
- Dinamarca e Noruega (4)
- Roménia (6)
- Bélgica (10)
- Espanha (20)
- Polónia (31)
- República Checa (41)
- França (mais de 100)

Comparativamente com os outros países, onde a fabricação aditiva está presente em diversas indústrias, Portugal ainda apresenta uma dimensão muito reduzida, estando ao nível de países como a Eslovénia e a Eslováquia, no entanto, a adoção desta tecnologia por parte de determinada empresa requer um estudo prévio de modo a verificar qual o seu verdadeiro valor. A FA não só ajuda as empresas a ganharem competitividade no mercado atual, mas também aumenta a eficiência das cadeias de fornecimento e operações. Estes benefícios são, segundo (EY, 2016), compreendidos em três parâmetros diferentes:

- Eficiência;
- Crescimento;
- Transformação;

O impacto da fabricação aditiva na estratégia de negócio da empresa pode ser compreendido como o impacto que esta tecnologia vai ter na empresa, no design do produto e nas cadeias de fornecimento e operações.

A nível da empresa o impacto irá dar origem a novos modelos de negócio e ao reposicionamento da cadeia de valor que por sua vez irão afetar o modelo de negócio.

Quanto ao design do produto as vantagens principais são:

- Novos clientes e mercados;
- Novas estruturas e geometrias;
- Personalização do produto;
- Integração funcional;

Resultado final: Crescimento

Ao nível das cadeias de fornecimento e de operações:

- Desenvolvimento eficiente do produto e rápida chegada ao mercado;
- Processos de fabricação eficientes e alta utilização do material;
- Baixos preços de manutenção e engenharia;
- Baixos inventários e transporte reduzido;

Resultado final: Eficiência Operacional

Um bom modelo de negócio que esteja aliado ao crescimento e eficiência operacional irá dar origem ao aumento do lucro da empresa (EY, 2016).

5.8.2 CEiiA

No dia 24 de Julho de 2017 foi realizada uma visita ao CEiiA. O âmbito desta visita foi compreender melhor de que forma a fabricação aditiva está presente não só no CEiiA mas também no Mercado nacional. Para tal, o Engenheiro Manuel Oliveira, chefe da área de Produção de Engenharia descreveu o papel da empresa no mercado, o tipo de trabalho realizam, os objetivos que se pretendem, as várias áreas de trabalho, as várias indústrias em que o CEiiA está presente e que tipos de componentes se produzem.

Esta empresa, localizada em Matosinhos, pode ser definida como sendo um centro de engenharia e desenvolvimento do produto, que todos os anos investe cerca de 10 milhões de euros em projetos de inovação e desenvolvimento, com foco nas indústrias automóvel, aeronáutica, naval e na mobilidade. O CEiiA trabalha com vários parceiros a nível nacional, sobretudo pequenas e médias empresas, ajudando no desenvolvimento do produto,

implementação de processos inovadores e também promovendo a integração destas empresas nas linhas de produção a nível global.

As parcerias com empresas estrangeiras também estão presentes, o CEiiA trabalha com parceiros a nível internacional de modo a estar atualizado face às mais recentes exigências e tendências, a nível tecnológico, presentes no mercado mundial.

No ramo da Engenharia Aeronáutica, a empresa dedica-se principalmente ao desenvolvimento do produto, realização de testes estruturais e na investigação de UAV's. No que diz respeito ao desenvolvimento do produto, o CEiiA investe sobretudo nas áreas de design, análises estruturais, estudo da aerodinâmica das estruturas, interiores das aeronaves e equipamento de suporte no solo (*Ground Support Equipment*).

Neste contexto, o tema principal desta visita foi verificar de que forma é aplicada a fabricação aditiva na linha de produção da empresa e que tipo de equipamentos e técnicas de produção se utilizam.

Atualmente, o CEiiA possui uma máquina de fabricação aditiva, fabricada pela empresa Portuguesa Adira, que utiliza o processo inovador de *Tiled Laser Melting* para produção de peças. Esta máquina designada pela Adira como sendo a maior máquina de produção híbrida de larga escala em 3D, combina os processos de produção de *Powder Bed Fusion*, *Direct Metal Deposition* e corte por laser tudo numa só máquina. De realçar que esta máquina apresenta um dos maiores volumes de construção existentes, o que permite fabricar peças com dimensões superiores, tornando a Adira a primeira empresa fabricante deste tipo de sistema que combina tecnologias de fabricação aditiva para a produção dos componentes.

A tecnologia de *Tiled Laser Melting* (TLM) divide a área de construção existente em pequenos segmentos (*tiles*) que são processados sequencialmente dando origem a uma só peça ou a várias peças de menor dimensão (300x300 mm) no final do processo. A tecnologia de *Direct Laser Processing* (DLP) também está presente na máquina, tornando possível o fabricante escolher se prefere produzir mediante métodos subtrativos (corte por laser) ou recorrendo à tecnologia aditiva. Isto apenas é possível devido à elevada capacidade de configuração da máquina que pode ser adaptada a diversas condições de trabalho e tipos de peças que se pretende produzir.

Para o processo de produção utilizando à tecnologia de *Powder Bed* a área de construção é de 960 x 960 mm enquanto que utilizando o processo de *Direct Metal Deposition* a área é de 1500 x 1500 mm. Esta máquina conceptual torna-se bastante atrativa na medida em que consegue anular certas desvantagens típicas da fabricação aditiva, nomeadamente ao nível da dimensão das peças produzidas e forma. Na Figura 45 é possível visualizar a máquina que o CEiiA possui.



Figura 45 Máquina de fabricação aditiva Adira TLM

Fonte: <http://www.3ders.org/articles>

No entanto, o CEiiA encontra-se apenas a desenvolver a tecnologia subjacente à máquina da Adira visto que esta ainda não se encontra capaz de produzir as peças com as exigências requeridas. Vários parâmetros têm de ser devidamente estudados e posteriormente especificados, nomeadamente ao nível de temperaturas de fabricação, material utilizado para o fabrico de determinada peça e precisão com que o processo é realizado.

O CEiiA possui outras máquinas de fabricação aditiva da marca EOS com que se conseguem produzir peças com geometrias complexas mas sendo estas de plástico. Segundo o Eng. Manuel Oliveira atualmente já se consegue produzir praticamente qualquer tipo de formato desde que seja fabricado em plástico, no entanto, quando se trata em fabricar utilizando metal, são vários os fatores que ainda temos de ter em conta para conseguir produzir uma peça com a qualidade desejada.

O CEiiA prevê, após este período atual de desenvolvimento da tecnologia, conseguir produzir, nos próximos anos, alguns componentes recorrendo à máquina de TLM. No entanto, atualmente, a máquina consegue produzir peças, sem a exigência requerida para a indústria aeronáutica (e.g, físicas, resistência).

6- Mercado Aeronáutico Internacional

De modo a contextualizar o mercado aeronáutico em Portugal é necessário realizar em primeiro lugar uma apresentação acerca do mercado aeronáutico a nível mundial e de que forma este influencia o mercado do nosso país face às exigências ao longo dos últimos anos.

Na figura 46 verifica-se que o mercado internacional tem cada vez mais vindo a expandir-se, deixando de parte a hegemonia por parte do mercado americano e passando a ter organizações competitivas de todas as partes do mundo, principalmente Europeias e mais recentemente Asiáticas que têm vindo a emergir neste setor. Atualmente o setor é liderado pela *Boeing* e pela *European Aeronautic and Defense and Space Company* (Reis, 2011).

Na tabela 8 verificam-se as dez principais empresas do setor aeronáutico a nível mundial, em 2016, pelo valor total de receita que geraram durante esse ano. A *Boeing* e a *Airbus* surgem claramente destacadas no topo.

Tabela 8 Dez Principais Empresas do mercado aeronáutico a nível mundial

Fonte: (Deloitte, 2017)

Ranking	Empresa	Milhões de dólares
1	Boeing	94.571
2	Airbus Group	73.699
3	Lockheed Martin	47.248
4	General Dynamics	31.353
5	United Technologies	28.925
6	GE Aviation	26.261
7	Northrop Grumman	24.508
8	BAE Systems	24.129
9	Raytheon	24.069
10	Safran	18.247

Na figura 46 é possível verificar o país de origem das cem maiores empresas aeronáuticas a nível mundial e ainda constatar que Portugal não aparece neste ranking, demonstrando a enorme supremacia dos Estados Unidos em relação aos restantes países.

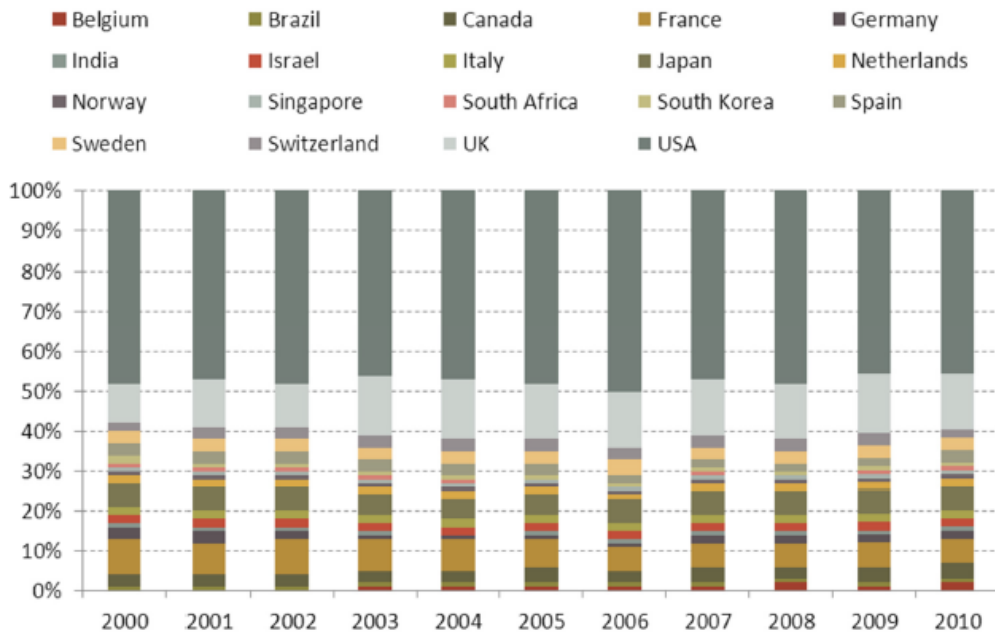


Figura 46 País de origem das cem maiores empresas aeronáuticas

Fonte: (Reis, 2011)

Segundo a empresa Deloitte (2017), o mercado aeronáutico global apresentou um crescimento de 2,4% em 2016 comparativamente a 2015 (658,7 para 674,4 milhares de milhões de dólares), tendo o setor aeronáutico europeu comercial registado elevadas entregas de aeronaves ao contrário do setor americano que experimentou um ligeiro declínio. No que diz respeito às duas maiores construtoras de aeronaves, a *Airbus* registou um aumento das receitas em 3,3 % em relação a 2015, resultado da venda de 688 aeronaves ao longo do ano, enquanto que a *Boeing* registou um decréscimo de 1,6 % (96,1 para 94,6 milhares de milhões de dólares) em comparação com 2015.

6.1 Fabricação aditiva no mercado internacional

Segundo um estudo a nível mundial realizado pela empresa consultora Gartner (2014), 60% das organizações afirmam que o principal fator que leva à baixa adoção da tecnologia de fabricação aditiva são os elevados custos associados. No entanto, o estudo também demonstra que as empresas que adotaram a tecnologia recentemente já apresentam diversos benefícios.

Neste estudo constatou-se que 53% dos inquiridos apontaram as organizações de I&D como o ramo mais influente e responsável pelas estratégias de crescimento associadas à tecnologia de fabricação aditiva. Outro fator realçado no estudo é que as empresas que utilizam a tecnologia como parte da linha de produção geralmente reduzem os custos associados à pesquisa e desenvolvimento do produto em cerca de 4%.

Na figura 47 verificam-se as principais razões que levam as empresas internacionais a adotar a FA.

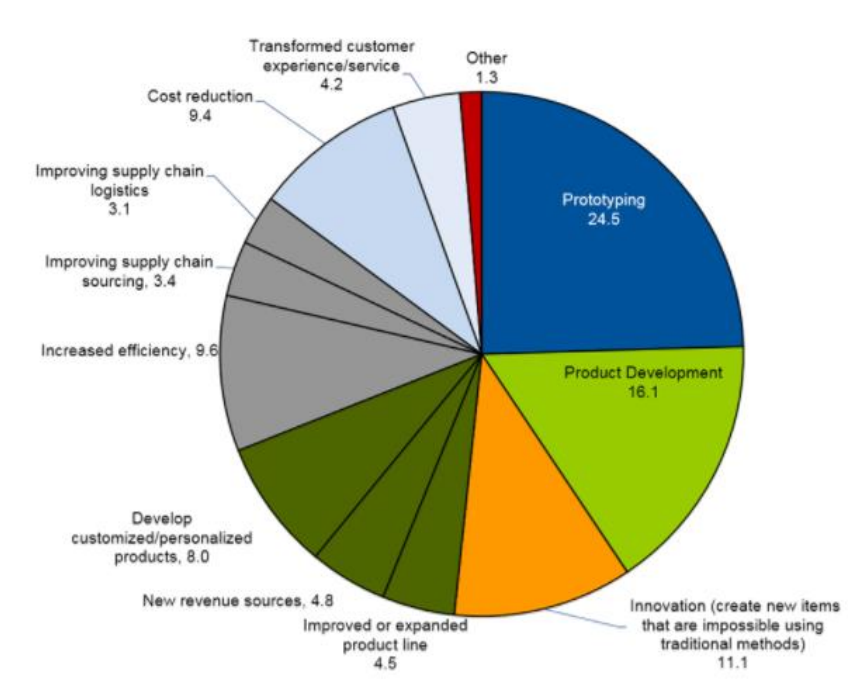


Figura 47 Razões que levam à adoção da fabricação aditiva

Fonte: (Gartner, 2014)

A prototipagem, o desenvolvimento do produto e a inovação apresentam-se como as razões que levam as empresas a apostar nesta tecnologia sendo a redução dos custos também um fator importante.

A taxa de adoção da tecnologia 3D também é um fator importante a verificar de modo a contextualizarmos a indústria portuguesa como se verifica nas figuras 48, 49 e 50. As

empresas que adotaram os métodos de fabricação aditiva encontram-se principalmente a realizar prototipagem, a tentar descobrir novas maneiras de como poderão aplicar a tecnologia e a produzir peças (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014).

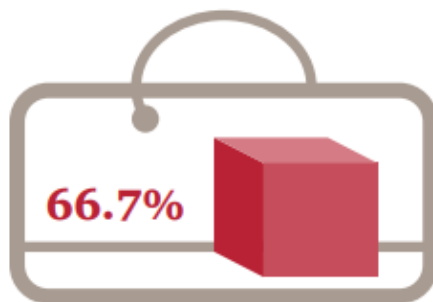


Figura 48 Percentagem de empresas que utilizam a fabricação aditiva

Fonte: (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014)

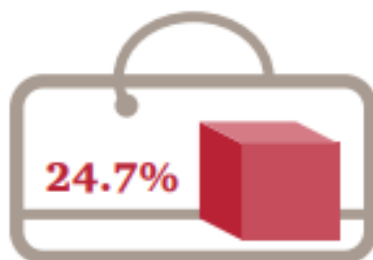


Figura 49 Percentagem de empresas que planeia vir a utilizar a fabricação aditiva

Fonte: (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014)

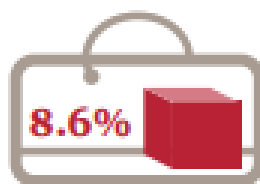


Figura 50 Percentagem de empresas que não planeia vir a utilizar a fabricação aditiva

Fonte: (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014)

Na figura 51 são apresentadas as principais razões, que segundo o estudo realizado pela empresa consultora PwC (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014), constituem uma desvantagem para a adoção da tecnologia de fabricação aditiva.

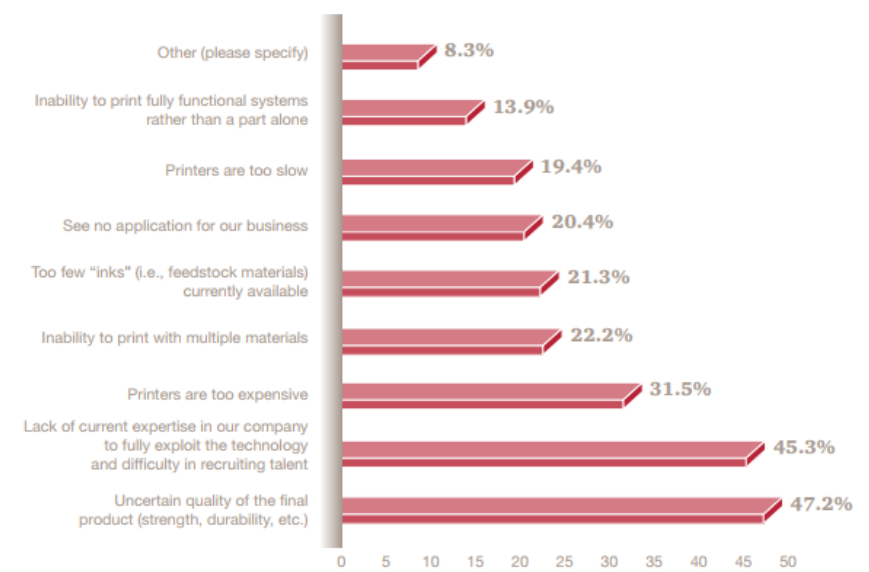


Figura 51 Principais razões para a não adoção da fabricação aditiva

Fonte: (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014)

A qualidade do produto final, o custo do equipamento necessário para a produção e a falta de mão de obra qualificada para desenvolver a tecnologia são as principais razões que dificultam a adoção da tecnologia de fabricação aditiva por parte das empresas.

Na tabela seguinte é apresentada uma comparação entre as pequenas empresas e as grandes empresas, referente à diferença existente na adoção da fabricação aditiva.

Tabela 9 Comparação entre Pequenas e Grandes Empresas

	Pequenas Empresas	Grandes Empresas
Utilizam a FA	59%	75%
Planeiam vir a utilizar a FA	26%	23%
Não planeiam utilizar a FA	15%	2%

Fonte: (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014)

No que diz respeito às pequenas empresas, 59% atualmente utilizam a fabricação aditiva, 26% planeia vir a utilizar no futuro e 15% planeia nunca vir a utilizar a tecnologia. Nas grandes empresas, 75% utiliza a fabricação aditiva como opção, 23% planeia vir a utilizar e apenas 2% é que não planeia vir a utilizar.

Segundo o estudo realizado pela empresa consultora PwC (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014), sobre os benefícios que provêm da adoção da fabricação aditiva no setor aeroespacial, os custos relativos às empresas de MRO (Manutenção, Reparação e Operação) podem ser reduzidos até 3,4 milhares de milhões de dólares, assumindo que 50% das peças fabricadas são com recurso à FA. No figura 52 verifica-se a redução dos custos em função da taxa de implementação da tecnologia.

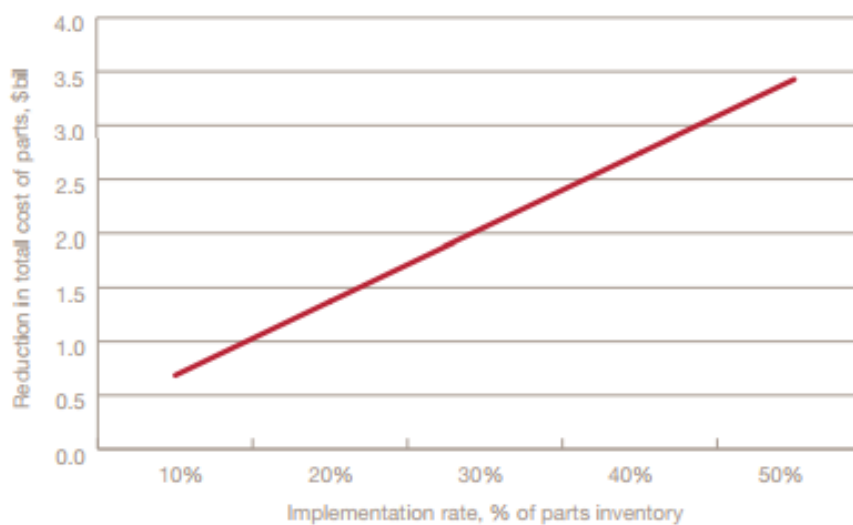


Figura 52 Redução dos custos em função da taxa de implementação da FA

Fonte: (McCutcheon, Pethikc, Bono, & Thut, 2014)

7- Conclusões e trabalhos futuros

7.1 Síntese

Neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do estudo realizado, sendo descritos os contributos do trabalho desenvolvido e enunciados os vários caminhos a tomar de modo a constituir a fabricação aditiva uma opção para as diversas empresas industriais portuguesas.

A comparação entre os dados apresentados no estudo realizado em Portugal e o estudo realizado a nível Internacional foi a metodologia utilizada para compreender o panorama atual da tecnologia e daí apresentar caminhos para que esta se dinamize cada vez mais, sendo possível compreender de que forma as empresas encaram a fabricação aditiva como uma opção e que parâmetros devem ser melhorados.

Ao longo da dissertação foi importante responder a diversas perguntas, que se revelam cruciais para a compreensão do tema, tais como:

- O que é a Fabricação aditiva?
- Quais são as vantagens desta tecnologia em comparação com os métodos de fabricação tradicionais?
- Qual o grau de utilização da fabricação aditiva em Portugal?
- O que se espera desta tecnologia no futuro?

O caráter desta dissertação incide acima de tudo em realçar aquilo que poderá vir a ser feito no país em comparação com o que já acontece em mercados de maior dimensão, sendo esta a principal finalidade deste trabalho.

No início desta dissertação foi apresentada a tecnologia de fabricação aditiva bem como todos os processos de produção que a constituem, vantagens e desvantagens face aos métodos tradicionais e as várias indústrias que aplicam os processos de fabricação que constituem esta tecnologia. Esta parte da dissertação tem um papel importante no objetivo do trabalho visto que é aqui que se encontram detalhados os diversos parâmetros referentes à tecnologia, sendo estes fatores que podem vir a influenciar as empresas nacionais a adotarem ou não esta tecnologia, mediante o tipo de componentes e peças que pretendam produzir.

Apesar das vantagens mais significativas que provêm da fabricação segundo métodos aditivos, onde se salienta a facilidade de produzir peças com geometrias bastante complexas, criar protótipos muito mais rapidamente e a redução do material desperdiçado, a tecnologia de impressão 3D ainda apresenta muitas limitações inerentes à tecnologia que faz com que atualmente as empresas continuem a fabricar recorrendo aos métodos subtrativos tradicionais.

Essas limitações em síntese são as seguintes:

- taxa de produção lenta em comparação com os processos de fabricação tradicionais;
- elevados custos de produção;
- processos de fabricação que requerem pós-processamento;
- componentes com dimensão reduzida;
- propriedades mecânicas fracas;

Este trabalho de investigação incluiu ainda uma visita ao CEiiA que permitiu apurar como em Portugal a dimensão da fabricação aditiva é bastante reduzida em comparação com outros países. A produção de peças para a indústria aeronáutica por fabricação aditiva é inexistente e as poucas empresas que possuem equipamentos de FA, como o CEiiA, encontram-se a desenvolver a tecnologia para que no futuro possam produzir as peças desejadas satisfazendo requisitos semelhantes às produzidas com tecnologia convencional.

Tratando-se de uma tecnologia que envolve a aquisição de equipamentos de produção (impressoras) que obrigam a investimentos elevados e que estão em constante desenvolvimento, as empresas nacionais não têm capacidade de realizar este tipo de investimentos de alto risco.

Sendo o setor industrial nacional constituído principalmente pelas pequenas e médias empresas (27,7%) e pelas microempresas (71,5%), não há capacidade de realizar o investimento requerido para adotar a tecnologia de FA por parte destas empresas, e mesmo que algumas possuem tal capital, o risco associado é elevado.

O fator do risco prende-se, sobretudo, com o facto de nenhuma empresa pretender realizar um investimento tão elevado em equipamentos que estão em constante evolução e não garantem um produto de qualidade a 100%.

A aposta em projetos de I&D é fundamental para a dinamização da tecnologia de fabricação aditiva em Portugal sendo que atualmente Portugal se encontra a sair de uma fase em que o investimento neste tipo de projetos baixou bastante durante os últimos seis anos em comparação com os anos anteriores. Portugal encontra-se entre os países da União Europeia que menos investe neste ramo com 1,64% do PIB refletindo-se este valor no impacto que o desenvolvimento de tecnologias inovadoras tem no mercado industrial nacional.

Sendo a fabricação aditiva uma tecnologia que atualmente se encontra a necessitar de um grande investimento de modo a desenvolver-se cada vez mais, como consequência, quanto maior for o investimento em I&D maior será a capacidade de implementar este tipo de tecnologias no setor industrial português e consequentemente no setor aeronáutico.

No entanto, além da aposta reduzida por parte de Portugal em I&D, existem outros fatores responsáveis pela dimensão reduzida da tecnologia de fabricação aditiva no país.

A utilização desta tecnologia é relativamente baixa sendo que algumas empresas planeiam adotar a fabricação aditiva e outras não a consideram como opção futuramente.

Segundo se apurou, as três principais finalidades que levam as empresas a apostar na fabricação aditiva são a prototipagem, a capacidade de produzir componentes inovadores e a partilha de custos.

Uma das principais dificuldades, que as empresas que atualmente utilizam processos aditivos assumem, é a fraca capacidade e consistência das impressoras disponíveis, que sendo equipamentos com um custo bastante elevado, se torna um fator que por vezes demove a aposta das empresas nesta tecnologia. Portanto, o contínuo desenvolvimento da tecnologia associada às impressoras 3D é da maior importância de modo a garantir ao consumidor o fabrico de peças de elevada qualidade e com consistência.

Devido ao pouco poder de investimento em comparação com os outros países, segundo o CEiiA, Portugal encontra-se em parte dependente das tomadas de iniciativa por parte dos países que possuem elevadas capacidades de investimento e por consequência possuem maior capacidade para desenvolverem a tecnologia de fabricação aditiva.

Segundo a empresa consultora líder mundial Gartner (2014), a tecnologia de FA tornou-se um fator apelativo a várias empresas pertencentes às mais variadas áreas de negócio, desde a indústria médica à indústria aeroespacial, sendo que os vendedores dos sistemas 3D necessitam de realizar um trabalho mais próximo do consumidor, de modo a identificarem potenciais aplicações da tecnologia, que ainda se encontram desconhecidas. O contínuo desenvolvimento da tecnologia e a aposta no marketing são fundamentais para mostrar como a fabricação aditiva pode constituir uma vantagem competitiva para as empresas utilizadoras.

No fundo, a adoção destas estratégias de negócio utilizadas nos outros países é do maior interesse para Portugal na medida em que são ideias e fundamentos que ajudam a desenvolver a fabricação aditiva no país e por consequência a dinamizar a indústria.

Comparando o estudo realizado por Santos (2016) ao mercado nacional com o estudo realizado pela empresa consultora PwC (McCutcheon, Pethick, Bono, & Thut, 2014), são tiradas várias conclusões através dos dados apresentados. Visto que o setor português é maioritariamente constituído pelas PME, faz sentido analisar o nível de adoção da fabricação aditiva por este tipo de empresas.

No estudo realizado por Santos (2016) ao setor industrial português, das empresas inquiridas, apenas 19% utilizavam atualmente processos de fabricação aditiva sendo que 61% não planeiam adotar esta tecnologia no futuro. Por sua vez, no estudo realizado pela empresa consultora PwC a diferentes empresas a nível mundial, 59% destas utilizam processos de fabricação aditiva enquanto que apenas 15% não planeiam vir a utilizar.

Estes números apresentados são bastante caracterizadores do panorama atual da fabricação aditiva em Portugal, sendo completamente o inverso do que acontece no resto dos outros países, onde a taxa de adoção da tecnologia é de cerca de 60% face aos quase 20% registados em Portugal.

Obviamente, este número é o resultado de diversos fatores sendo o económico o grande diferenciador, já que países como Estados Unidos, Alemanha e Reino Unido possuem

uma maior capacidade de apostar nestas tecnologias devido às suas capacidades económicas. O baixo investimento em I&D em Portugal, em comparação com os outros países, é um dos fatores responsáveis pela existência de uma grande diferença na taxa de adoção da fabricação aditiva.

Um maior apoio económico às empresas portuguesas e um maior investimento em projetos de I&D é um fator crucial para que a tecnologia de FA cresça a nível nacional e para que futuramente a taxa de adoção cresça.

A fabricação aditiva atualmente ainda apresenta diversas falhas que fazem com que não seja fácil apostar em tal tecnologia, ainda para mais sendo os equipamentos de produção dispendiosos e não garantindo um produto final com a qualidade desejada. Segundo o estudo da empresa PwC foi revelado que as empresas consideram que os principais inconvenientes inerentes à adoção da FA, além do custo dos equipamentos de produção, são a falta de mão de obra qualificada (45,3%) e a qualidade do produto final (47,2%). Em Portugal 55% das empresas inquiridas revelam a qualidade do produto final a grande desvantagem da FA.

Tendo em conta estes dados é facilmente constatável que a tecnologia de fabricação aditiva necessita de um investimento bastante elevado por parte das empresas de modo a ser possível otimizar a maneira com que os processos de produção são realizados e a tornar a tecnologia capaz de produzir peças que o consumidor considera de elevada qualidade. Em comparação com o que se passa em empresas como o CEiiA, que se dedicam ao desenvolvimento da tecnologia, esta é a filosofia ideal que deveria ser adotada em Portugal de modo a ser possível inovar, desenvolver e dinamizar a fabricação aditiva.

O facto de existir um baixo número de empresas no ramo da aeronáutica em Portugal com certificado POA limita bastante a dinamização da fabricação aditiva no país na medida em que a fabricação de peças através desta tecnologia é bastante limitada. No entanto, o país tem apresentado evoluções sendo uma delas a criação de um cluster aeronáutico que é responsável por uma faturação de 1700 milhões de euros dos quais 80% correspondem a exportações.

Podemos então concluir que a implementação da fabricação aditiva no setor industrial português, especialmente no setor aeronáutico, é um processo que irá levar o seu tempo, no entanto, caso as empresas façam o devido investimento e desenvolvimento da tecnologia, com um apoio maior do estado, a fabricação aditiva poderá vir a constituir cada vez mais uma opção nas linhas de produção das empresas portuguesas.

7.2 Trabalhos futuros

A realização de visitas às empresas líderes do mercado, no que diz respeito à utilização da fabricação aditiva nas cadeias de produção, é fundamental de modo a conseguir-se adotar novas ideias e fundamentos que possam ser aplicados nas empresas portuguesas, que levem ao crescimento da tecnologia em Portugal.

Estes diversos estudos que se podem vir a fazer ao mercado português e ao mercado exterior são fundamentais para se conseguir ter uma ideia do que é necessário fazer e melhorar para que a fabricação aditiva se dinamize cada vez mais no mercado empresarial do nosso país.

Bibliografia

- Advanced Manufacturing. (Maio de 2016). Additive Manufacturing : The State of the industry. Obtido de <http://www.sme.org/MEMagazine>
- Arcam EBM. (s.d.). *EBM in Aerospace*. Obtido de Arcam EBM: <http://www.arcam.com/solutions/aerospace-ebm/>
- Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khots, S., Gujar, K., & Singh, R. (2014). A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing. *Bharat Forge Ltd*.
- Bikas, H., Stavropoulos, P., & Chryssolouris, G. (2014). Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. 3-4.
- Campbell, T., Williams, C., Ivanova, O., & Garrett, B. (2011). Could 3D Printing change the World? *Atlantic Council*, 1-5.
- Cotteleer, M., Holdowski, J., & Mahto, M. (6 de Março de 2014). *The 3D opportunity primer*. Obtido de Deloitte University Press: <https://www.dupress.deloitte.com>
- Coykendall, J., Cotteleer, M., Holdowsky, J., & Mahto, M. (2014). 3D opportunity in aerospace and defense. *Deloitte University Press*.
- Dehoff, R., Duty, C., Peter, W., Yamamoto, Y., Chen, W., Blue, C., & Tallman, C. (2013). Additive Manufacturing of Aerospace Brackets. *Advanced Materials & Processes*.
- Deloitte. (2017). *Global aerospace and defense sector financial performance study*.
- Deloitte analysis. (2012). *3D Printing and the future of manufacturing*. Obtido de Deloitte University Press: <http://www.dupress.deloitte.com>
- Dietrich, S., Wunderer, M., Huissel, A., & Zaeh, M. (2016). *A New Approach For A Flexible Powder Production For Additive Manufacturing*. Obtido de Procedia Ma.
- dos Santos, S. L. (2016). *Impressão 3D: Perspetivas de adoção na Indústria Portuguesa (Tese de Mestrado)*.
- EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01. (4 de Abril de 2017). *EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01*.
- European Powder Metallurgy Association. (2015). *Introduction to Additive Manufacturing Technology*.
- EY. (2016). How will 3D printing make your company the strongest link in the value chain? *EY'S Global 3D printing Report 2016*.

- Farinia Group. (s.d.). *Available Materials for Metal Additive Manufacturing : Characteristics & Applications*. Obtido de Farinia Group : <http://www.farinia.com>
- Felizardo, J. R., & da Cunha, F. V. (2007). A Indústria Aeronáutica Europeia e Oportunidades para Portugal. *INTELI*.
- Fell, J. (11 de Outubro de 2016). *3D printing in the aviation industry*. Obtido de E&T Engineering and Technology: <http://www.eandt.theiet.org>
- Filipe, P. M., & Guedes, A. P. (2004). As Pequenas e Médias Empresas e a Cadeia de Abastecimento da Indústria Aeronáutica.
- Freedman, D. (19 de Dezembro de 2011). *Layer by Layer*. Obtido de MIT Technology Review: <https://www.technologyreview.com/s/426391/layer-by-layer/>
- Gartner. (9 de Dezembro de 2014). Obtido de Gartner: <http://www.gartner.com>
- Giffi, C., Gangula, B., & Illinda, P. (2014). 3D opportunity in the automotive industry. *Deloitte University Press*.
- Guerra, J. H. (2011). O modelo de integração de sistemas da indústria aeronáutica : fatores motivadores.
- INE. (2016). Obtido de PORDATA: <http://www.pordata.pt>
- Instituto Politécnico de Leiria. (2011). *Processos de alteração de forma*. Obtido de <http://www.wiki.ued.ipleiria.pt>
- Lakner. (Julho de 2014). Obtido de AT Kearney: <https://www.atkearney.com>
- Leandri, A. (17 de Setembro de 2015). *A Look into Powder Materials for Metal 3D Printing*. Obtido de 3D Printing Industry: <http://www.3dprintingindustry.com>
- Loughborough University. (s.d.). *About Additive Manufacturing*. Obtido de <http://www.lboro.ac.uk>
- McCutcheon, R., Pethick, R., Bono, B., & Thut, M. (Junho de 2014). *3D printing and the new shape of industrial manufacturing*. PwC. Obtido de 3D : <http://www.pwc.se/sv/pdf-reports>
- Mokasdar, A. (2012). A quantitative study of the impact of additive manufacturing in the aircraft spare parts supply chain. *University of Cincinnati*.
- Murr, L., & Johnson, W. (2016). 3D metal droplet printing development and advanced materials additive manufacturing. *Journal of Materials Research and Technology*, 5.

- Popovich, A., & Sufiiarov, V. (2016). Metal Powder Additive Manufacturing. In I. Shishkovsky, *New Trends in 3D Printing* (p. Capítulo 10). InTech.
- Porter, M. (1993). *The competitive advantage of nations*. Free Press.
- Reis, A. C. (2011). *The Aerospace Industry: a Descriptive and Prospective Empirical Analysis for Portugal (Tese de Mestrado)*.
- Santos, B. J. (2013). *A Indústria Aeronáutica em Portugal Diagnóstico e Perspetivas de Desenvolvimento*.
- Silva, S. (21 de Agosto de 2017). Obtido de Publico: <http://www.publico.pt>
- Snyder, G., Cotteleer, M., & Kotek, B. (28 de April de 2014). *3D opportunity in medical technology*. Obtido de Deloitte University Press: <http://www.dupress.deloitte.com>
- Stratasys Inc. (2012). *A new mindset in product design*.
- The World Medical Markets Facts Book*. (2012). Espicom Business Intelligence Ltd.
- V.Wong, K., & Hernandez, A. (17 de Junho de 2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*, 1-3. Obtido de <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>

Anexo

Política de Certificação EASA e guia para de certificação DOA, ADOA, POA

“All aviation parts and products are required to meet the relevant certification specifications respectively, including the ETSO minimum performance standards, according to the type certification basis, e.g. regarding strength, durability, flammability etc., regardless of the material and process combination used to generate the engineering properties. Independent of the facility where parts are to be fabricated the applicant should demonstrate by test or experience, that the material is suitable for the intended use of the part being fabricated and that the material is being purchased per an approved material specification and controlled by approved inspection methods. The applicant should show that the derived AM design values are based upon representative statistically significant test data (to the level required by the applicable CS code and application) which is adequately robust to addresses all key production parameters and which is sufficiently robust to capture machine-to-machine variation within and between facilities. Furthermore, it should be shown that values obtained from tests conducted on simple specimens accurately represent the mechanical properties of the intended parts. However, complex parts and processes may require testing in the test/analysis pyramid above coupon level to truly represent the engineering properties resulting from the material and process combination. In addition to the established production process parameters, actual part properties are influenced by multiple other factors, including part orientation during the build process and the support structure required during the build operation (which is subsequently removed). Furthermore, the part configuration may include inaccessible surfaces (which cannot be machined or surface treated) such that the engineering properties may be different to those of the bulk material and/or other machined or surface treated material. There may also be a potential anisotropy resulting from sequential layer-by-layer addition of material. The applicant is responsible for ensuring that design values used in the evaluation of any parts produced using AM are applicable to the material and process specifications used to fabricate the parts and that the design values are applicable to the facilities at which the parts are fabricated. This should be supported by appropriate process and inspection controls such that Product integrity is maintained. Applicants should also provide evidence that materials and processes are addressed by specifications that are under revision control. The use of additive manufacturing should also be considered when establishing the certification programme in accordance with 21.A.20” (EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01, 2017) .

Reparações e Mudanças de Design

“In accordance with the Guidance Material contained in Appendix A to GM 21A.91 the use of AM in Changes and Repairs to Type Certificates and Supplemental Type Certificates is

considered to be a change to the material, process and method of manufacture and should be evaluated as such when classifying changes and repairs. For repair and repair design the guidance contained in this Certification Memoranda (relevant requirements under appendix 1 of this CM) should also be considered when evaluating the use of AM. The use of AM in repairs and design changes may be classified Major based upon the level of substantiation required. Applicants are advised to consult the Agency when introducing AM in repairs including cases where they hold a privilege for repair design approval” (EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01, 2017).

Impacto da FA nas DOA

“Design Organisation Approval Holders as well as ADOA are advised to involve the Agency at the earliest opportunity during the development and implementation of AM. It is envisaged that the use of AM will be subject to increased oversight by the agency and that specific audits will be scheduled to examine the introduction and use of AM within the scope of the design organisation audit cycle. These audits may take place concurrently with the review of AM applications rather than post approval. Note: The introduction of additive manufacturing may represent a significant change to the Design Assurance System of the DOA Holder according to 21.A.247 and the approval process for such a change should be followed by the respective DOA Holder” (EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01, 2017).

Impacto da FA nas POA

“Production Organisation Approval holders are advised to inform their respective competent authorities at the earliest opportunity before the implementation of AM processes. Implementation of an AM process by a POA holder is controlled through the applicable design data identified and transferred to the POA holder under the responsibility of the design approval applicant or holder. The design approval applicant or holder is also responsible for showing that the applicable design data complies with the requirements of 21.A.31. The POA holder shall ensure compliance to the applicable design data of the items it produces under its POA. EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01 © European Aviation Safety Agency. All rights reserved. ISO9001 Certified. Proprietary document. Copies are not controlled. Confirm revision status through the EASA-Internet/Intranet. An agency of the European Union Page 6 of 8 Implementation of an AM process by a POA holder that is new for the POA holder is a change that may be identified as a significant change in accordance with Part 21.A.147 and related guidance material. Depending on circumstances, such a change may not necessarily be a significant change. It is ultimately the responsibility of the TCH to ensure the method, or any changes, are appropriately addressed. Therefore, a robust communication process between the POA and the DOA should be demonstrated. Applicants are therefore reminded of the published design data requirements in Part 21.A.131. To ensure that such a change

does not result in any non-compliance with Part 21 Section A Subpart G, it is in the interest of both the competent authority and the POA holder, to establish a relationship and exchange information that will permit the necessary evaluation work to be conducted before the implementation of the change. In case of such a change, the competent authority is recommended to inform the EASA Certification Directorate, and, as usual, these parties are also recommended to cooperate closely. It is recommended that the use of AM will be subject to specific oversight by the competent authority, either in the frame of significant change(s) according to Part 21.A.147 (when applicable) and/or continued surveillance of the POA” (EASA CM No.: CM-S-008 Issue 01, 2017).

Este memorando é aplicável a todas as organizações aeronáuticas que pretendam a certificação de produtos, peças e aplicações, mudanças de design e reparações a peças que estejam reguladas pelos requerimentos CS-22, CS-VLA, CS-23, CS-25, CS-VLR, CS-27, CS-29, CS-E, CS-APU.