



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR
Engenharia

Estudo sobre Perspetiva de Aplicação de Tecnologia de Manufatura Aditiva ao Setor Aeronáutico

Sílvia Marlene Canelas de Almeida

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor José Manuel Lourenço da Saúde

Covilhã, outubro de 2017

Agradecimentos

O culminar desta etapa académica foi possível devido ao apoio de várias pessoas.

Quero agradecer ao Professor Doutor José Manuel Lourenço da Saúde pela iniciativa deste trabalho, assim como pela disponibilidade para a sua orientação.

Ao Sr. Engenheiro Manuel Oliveira, do CEIIA, pela sua disponibilidade e por me ter dado a conhecer os projetos da empresa relacionados com o tema, assim como pela partilha de conhecimentos nesta área.

Quero agradecer também aos meus amigos que me ajudaram a crescer, a chegar e a concluir esta etapa: Laura Pais, Alexandra Silva, Daniela Ribeiro, Diogo Paulo, Carlos Cavaleiro, Alexey Nievnitsa, Ana Cerdeira, Ana Azevedo, Pedro Carneiro, Laura Martins, Fábio Ventura e Adriano Andrade.

Ao Sr. Batalha um especial agradecimento por tudo o que me ensinou, pela paciência que teve comigo, pelas palavras sábias e pelas de incentivo.

Ao Sandro, Filipe e Meno por me terem deixado fazer parte da família. Em especial à Mena, a quem estarei eternamente agradecida, por ter sempre desempenhado o papel de amiga, conselheira, protetora e quase mãe.

À minha irmã, cuja fragilidade foi tantas vezes motor da minha resiliência. Aos meus avós, em especial à minha avó Amélia pela sua ternura e bravura inspiradora.

Ao meu namorado Rúben por ter sido o meu pilar e me ter ajudado a ultrapassar todas as adversidades que comigo se cruzaram durante este percurso.

À D. Fernanda por me ter recebido tão bem nesta cidade, pela companhia e pela amizade que ficou. Aos pais do Rúben pela amizade, apoio e palavras de incentivo.

Aos meus pais, pelo exemplo de trabalho e sem os quais não teria conseguido.

Resumo

O assunto da manufatura aditiva que consiste na deposição de material camada a camada tem estado na ordem do dia.

A presente dissertação de mestrado aborda a exploração das várias possibilidades de aplicação futura da manufatura aditiva no setor aeronáutico, de acordo também com a opinião de empresas nacionais que produzem componentes.

Apresenta-se a gama de tecnologias MA, bem como as suas vantagens, incluindo os benefícios que a sua implementação tem já na Europa. Descrevem-se as dificuldades na implementação da tecnologia.

Apresentam-se também informações sobre componentes já fabricados recorrendo a fabricação aditiva, inclusive aqueles que já foram certificados pelas autoridades da aviação para voar. Analisam-se ainda os tipos de componente fabricados recorrendo à fabricação aditiva, o tipo de matéria-prima utilizado e o tipo de aplicação utilizada: prototipagem rápida, fabricação rápida, *rapid tooling* ou reparação rápida.

Para efeitos de certificação aeronáutica por via da FAA / EASA abordam-se aspetos específicos sobre as condições para a emissão desta certificação para voar de componentes obtidos por via da fabricação aditiva.

Finalmente, com base na análise feita e explorando algumas formas possíveis para a melhoria da tecnologia, tecem-se alguns caminhos para o desenvolvimento da MA no setor.

Palavras-chave

Manufatura aditiva, Aeronáutica, Aplicações em manufatura aditiva, Componentes para manufatura aditiva, Perspetivas da utilização da manufatura aditiva

Abstract

The subject of additive manufacturing, which consists of the deposition of material layer by layer has been the order of the day.

This dissertation addresses the various possibilities of future application of additive manufacture in the aeronautical sector, according to the opinion of national companies that produce components.

It presents the range of AM technologies as well as their benefits, including the benefits that their implementation already has in Europe. It is described the difficulties in implementing the technology.

It is described the components that are already made using additive manufacturing, including those already certified by aviation authorities to fly.

It is also analysed the types of components manufactured using the additive manufacturing, the type of raw material used and the type of application used: rapid prototyping, rapid manufacturing, rapid tooling or rapid repair.

For the purpose of aeronautical certification via the FAA / EASA, specific aspects regarding the conditions for the emission of this certification to fly components obtained through additive manufacturing are discussed, too.

Finally, based on the analysis made and exploring some possible ways to improve the technology, possible ways for the development of AM in the sector are identified.

Keywords

Additive Manufacturing, Aeronautics, Additive Manufacturing Applications, Additive Manufacturing Components, Additive Manufacturing Perspectives

Índice

Capítulo 1 - Introdução.....	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivo	2
1.3. Metodologia de Investigação	2
1.4. Estrutura do Trabalho	2
Capítulo 2 - Conceitos	5
Capítulo 3 - Estado da Arte.....	9
3.1. Definição de MA	9
3.2. Evolução da MA.....	9
3.3. O Setor Aeroespacial	12
3.3.1. Benefícios da MA.....	13
3.3.2. Barreiras	15
3.3.3. Normalização.....	18
3.3.4. Exemplos gerais de aplicação.....	20
3.3.5. O Caso Europeu	20
3.3.5.1. Projetos Europeus	24
3.3.6. Projetos Internacionais	36
3.3.7. Projetos Espaciais	42
3.4. Tecnologias MA	43
3.4.1. MA por fotopolimerização - Vat Photopolymerization (VP)	43
3.4.2. MA por projeção de material - Material Jetting (MJ)	46
3.4.3. MA por jato aglutinante - Binder Jetting (BJ).....	48
3.4.4. MA por extrusão - Material Extrusion	50
3.4.5. MA por fusão em camada de pó - Powder Bed Fusion (PBF)	52
3.4.6. MA por laminação - Sheet Lamination.....	58
3.4.7. MA por deposição dirigida de energia - Directed Energy Deposition (DED)..	61
Capítulo 4 - Perspetivas de expansão da MA ao setor aeronáutico.....	67
4.1. Em termos gerais.....	67
4.1.1. Análise de componentes, processos e materiais comuns.....	67
4.1.2. Regulamentos EASA/FAA	74
4.1.3. Limitações das tecnologias de MA	76
4.1.4. Potencial evolução da MA no setor	79
4.2. Componente nacional	83
Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros	87
5.1. Síntese conclusiva.....	87
5.2. Trabalhos futuros	88
Bibliografia	91

Lista de Figuras

Figura 1 - <i>Gartner Hype Cycle</i> (Gartner, 2017).	6
Figura 2 - Definição dos graus de TRL (KTN, 2012).	8
Figura 3- <i>Gartner Hype Cycle</i> de 2010 (European Comission, 2014).	9
Figura 4 - <i>Gartner Hype Cycle</i> de 2013 (European Comission, 2014).	10
Figura 5 - <i>Gartner Hype Cycle</i> para a Impressão 3D de 2015 (All3DP, 2015).	10
Figura 6 - Aplicações da MA segundo o estudo do DMRC (DMRC, 2016).	11
Figura 7 - Percentagem estimada do uso da MA na produção de peças (Wohlers Associates, 2011).	11
Figura 8 - Aplicação atual e potencial futuro da Impressão 3D na indústria (Ernst&Young, 2016).	12
Figura 9 - Previsão de crescimento da MA no setor aeronáutico (SmarTech, 2014).	12
Figura 10 - Fatores-Chave na produção aeronáutica (DMRC, 2011).	13
Figura 11 - Complexidade sem custo (European Comission, 2015).	16
Figura 12 - Estrutura proposta para normas da MA (CEN, 2015)	19
Figura 13 - <i>Roadmap</i> da normalização MA (European Comission, 2015).	19
Figura 14 - <i>Industrial Landscape Vision 2025</i> (Scapolo, et al., 2014).	21
Figura 15 - Indústria 4.0 vs indústria tradicional em termos de lucros e investimento capital (Dujin, Geissler, & Horstkotter, 2014).	22
Figura 16 - Condição de alguns países europeus face à Indústria 4.0 (Dujin, Geissler, & Horstkotter, 2014).	23
Figura 17 - Projetos de MA na Europa (1991-2013) (Muniz, 2016).	24
Figura 18 - Projetos de MA na Europa (2007-2014) (Muniz, 2016).	25
Figura 19 - <i>Roadmap</i> para o desenvolvimento técnico da MA (European Comission, 2014). ...	27
Figura 20 - Campos inovadores prioritários na indústria aeroespacial (DMRC, 2013).	28

Figura 21 - Dedução dos requisitos para os campos de inovação considerados (DMRC, 2013).	28
Figura 22- eAPU60, à esquerda (Safran, 2017); <i>Turbine nozzle</i> , à direita (Safran, 2017).....	30
Figura 23 - Projeto THOR (Airbus, 2016).	30
Figura 24 - Redução de massa possível com a MA (BionicAircraft, 2017).	31
Figura 25 - Conceito futuro da aeronave da <i>Airbus</i> impressa, para 2050 (Smithsonian.com, 2012).	31
Figura 26 - Conceito futuro da aeronave impressa da <i>Airbus</i> (BionicAircraft, 2017).....	32
Figura 27 - Consórcio do projeto <i>BionicAircraft</i> (BionicAircraft, 2017).	32
Figura 28 - Estrutura biônica para integrar o Airbus A350XWB (Airbus, 2016).	33
Figura 29 - <i>Bionic Partition</i> da <i>Airbus</i> para o A320 (The Living , 2017).	34
Figura 30 -Design anterior do conetor de combustível (à esquerda) e o otimizado (à direita) (LZN, 2017).	34
Figura 31 - Grelha de painel altifalante do <i>Jetstream 41</i> (Adams, 2017).	36
Figura 32 - Conjunto de processos do sistema de impressão de drones sob procura (U.S.Army, 2016).	37
Figura 33 - Componente em titânio fabricado com MA (Adams, 2017).	38
Figura 34 - ECD fabricado com MA (direita) e o anterior (esquerda) (Wohlers Associates, 2011).	40
Figura 35 - Estator em titânio (Powder Metallurgy Review, 2011).	40
Figura 36 - Encaixe produzido com MA do sensor T25 (GE Reports, 2015).	41
Figura 37 - Classificação dos processos de MA de acordo com a condição da matéria-prima. Adaptado de Muthu & Savalani (2016).	43
Figura 38 - Abordagem <i>Vector Scan</i> (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	44
Figura 39 - Abordagem <i>Mask Projection</i> (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	45
Figura 40 - Abordagem <i>Two-Photon</i> (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	45

Figura 41 - Esquema representativo do processo Jato de Material (Loughborough University, 2017).	46
Figura 42 - Deposição CS (esquerda) e DOD (direita) (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	48
Figura 43 - Esquema do processo <i>Binder Jetting</i> (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	49
Figura 44 - Esquema de um sistema de extrusão (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	51
Figura 45 - Esquema do processo sinterização seletiva por laser (SLS) (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	53
Figura 46 - Esquema do processo EBM (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	56
Figura 47 - Esquema de um processo <i>form-then-bond</i> (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	59
Figura 48 - Esquema da Consolidação Ultrassónica (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	60
Figura 49 - Esquema de um processo típico DED (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	62
Figura 50 - Ano de lançamento de programas de aviões e correspondentes preços do petróleo (Credit Suisse, 2017).	68
Figura 51 - Processo DED (esquerda), fresagem (centro), peça final (direita) (Brandt, 2016).	71
Figura 52 - Margens de lucro entre fabricantes de aeronaves e fornecedores (Credit Suisse, 2017).	72
Figura 53 - Possibilidade futura de construção de componentes por PBF (Roland Berger, 2016).	81

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Diferenças entre EBM e mLS (metal Laser Sintering) (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).	55
Tabela 2 - Novos programas de motor que não são mais uma tecnologia diferenciadora (Credit Suisse, 2017).	73
Tabela 3 - Proveniência da cadeia de abastecimento de <i>major modifications</i> ou incorporação de novos sistemas (Credit Suisse, 2017).	73
Tabela 4 - Risco de rutura da cadeia de abastecimento (Credit Suisse, 2017).	74
Tabela 5 - Componentes de motor com potencial para serem fabricados por MA (SmarTech, 2014).	83

Lista de Acrónimos

ACARE	Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe
AEWE	Army Expeditionary Warrior Experiments
AOG	Aircraft On Ground
APU	Auxiliary Power Unit
ASTM	American Society for Testing and Materials
BJ	Binder Jetting
CAD	Computer Aided Design
CDRSP	Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto
CE	Comissão Europeia
CEN	Comité Europeu da Normalização
CNC	Computer Numeric Control
DED	Directed Energy Deposition
DMLS	Direct Metal Laser Sintering
DMRC	Direct Manufacturing Research Center
DOA	Design Organisation Approval
EBM	Electron Beam Modeling
ECD	Environmental Control Ducting
EFFRA	European Factories of the Future Research Association
ESA	European Space Agency
FDM	Fused Deposition Modeling
FoF	Factories of the Future
FP	Framework Programme
GE	General Electrics
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILV	Industrial Landscape Vision
ISO	International Organization for Standardization
ISS	International Space Station
JIT	Just-in-Time
KET	Key Enabling Technology
LMD	Laser Metal Deposition
MA	Manufatura Aditiva
MARPA	Modification And Replacement Parts Association
MCRL	Manufacturing Capability Readiness Level
MJ	Material Jetting
MRO	Maintenance, Repair and Overhaul
NAMII	National Additive Manufacturing Innovation Institute
NNMI	National Network of Manufacturing Institutes
OEM	Original Equipment Manufacturer
ORNL	Oak Ridge National Laboratory
PBF	Powder Bed Fusion
P&W	Pratt & Whitney
POA	Production Organisation approval

ROCE	Return On Capital Employed
SL	Stereolithography
SLM	Selective Laser Melting
SLS	Selective Laser Sintering
SRA	Strategic Research Agenda
SRIA	Strategic Research and Innovation Agenda
TC	Technical Committee
TRL	Technological Readiness Level
UC	Ultrasonic Consolidation
UE	União Europeia
VP	Vat Photopolymerization
WIP	Work-in-Process

Capítulo 1 - Introdução

1.1. Motivação

A primeira revolução industrial consistiu na mecanização conduzida pela força do vapor, no século XIX. A segunda usou a energia elétrica para conduzir à produção em massa, no século XX. No século seguinte, a terceira automatizou a produção, recorrendo ao uso da eletrónica e das tecnologias de informação (TI). A quarta revolução industrial é considerada dinamizada pela internet, particularmente a mistura dos mundos real e virtual e da chamada Internet das Coisas. O mundo real está a transformar-se num enorme sistema de informações. A Indústria 4.0 fornece as respostas relevantes para a quarta revolução industrial (European Commission, 2014).

A Indústria 4.0 representa um novo nível de organização e controlo de toda a cadeia de valor, ao longo do ciclo de vida do produto, enfatiza a ideia da digitalização e a ligação de todas as unidades produtivas numa economia.

Uma das suas características é a *Smart factory*, ou melhor, *Factory 4*, que implica a aproximação de clientes e fornecedores, na medida em que é orientada para a personalização dos produtos. Engloba todas as fases do ciclo de vida, desde a ideia/requisitos, desenvolvimento e produção, à entrega do produto ao cliente final, passando pela reciclagem e serviços relacionados. Uma componente chave para a existência deste conceito consiste no desenvolvimento de novas tecnologias de produção, novos materiais e novas formas de armazenamento, processamento e partilha de dados. Surge, assim, a necessidade de máquinas que produzam os componentes desejados de forma mais rápida, flexível e precisa. Menos construção de protótipos, menos desperdício, menos processos de acabamento após produção do artigo no equipamento.

Ora, é neste contexto que surge a impressão 3D. Nos anos 80 designada por prototipagem rápida, era aplicada para criar protótipos usando resinas e polímeros. Quando o propósito é construir algo rápido, para usar como modelo conceptual e testar a funcionalidade, não é económico construir moldes ou manufaturar com métodos tradicionais, pelo que a prototipagem rápida serve muito bem. No entanto, estes protótipos apenas se assemelham à peça final no design ou função, mas não têm as mesmas propriedades definidas como especificação para a peça final. O conceito de Indústria 4 impõe o salto para a chamada Manufatura Aditiva (MA).

No setor aeroespacial, a nível europeu e internacional esta tecnologia começa a ser utilizada por alguns *OEM*. O que se pretende com este estudo é perspetivar o uso desta tecnologia no futuro, neste setor.

1.2. Objetivo

O objetivo da presente dissertação é perspetivar a utilização futura das tecnologias de MA no setor aeronáutico, recorrendo ao estado corrente do seu uso e também a considerações provenientes de empresas nacionais de produção de componentes aeronáuticos, incluindo ferramentas de produção de peças simples e para montagem.

1.3. Metodologia de Investigação

O trabalho baseou-se em pesquisa bibliográfica, seguida de uma análise, também ela, baseada em muitos pontos na literatura, a fim de perspetivar a utilização futura da MA. A validação dos resultados foi feita por entrevista a um membro de uma empresa portuguesa, a qual foi possível contactar, da área da produção do setor aeronáutico.

1.4. Estrutura do Trabalho

O capítulo 1, o presente, introduz o tema, motivação e objetivo.

No capítulo 2 apresenta-se a explicação de conceitos importantes na perceção do texto que se seguirá.

O capítulo seguinte retratará o estado da arte, sendo apresentada a definição de MA, seguida de alguma informação generalizada relativa à sua evolução. Também será introduzida a relação existente entre a MA e o setor aeroespacial, incluindo os principais fatores impulsionadores e barreiras na sua implementação neste setor. Serão ainda identificados em termos europeus e internacionais que projetos com base na MA já foram desenvolvidos ou estão em curso, incluindo a apresentação de alguns componentes que já foram aprovados pelas autoridades da aviação ou outros cuja produção está em curso. Posteriormente, serão apresentados os vários métodos de MA, a sua descrição e materiais usados.

No capítulo 4 constam as perspetivas do uso da MA em aeronáutica, que terão um teor mais opinativo e resultarão de uma análise sempre baseada no estado da arte apresentado anteriormente e em nova informação retirada da literatura. Inclui-se também uma breve avaliação da empresa que foi possível contactar sobre a temática em apreço.

Por fim, são tecidas as conclusões, no capítulo 5, e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 - Conceitos

AOG

Aircraft on ground refere-se a um problema grave o suficiente para impedir a aeronave de voar. De forma a evitar mais atrasos ou cancelamentos de voo, há a necessidade de ter o mais rápido possível as peças sobressalentes para que a aeronave volte ao serviço, marcando-se as embalagens de transporte com AOG (FAA, 2008).

Biomimética

Área interdisciplinar que pretende utilizar na ciência os conhecimentos da estrutura biológica dos seres vivos (Priberam, 2017).

Biónica

Ciência que tem por fim o estudo de certos processos biológicos com vista a aplicar processos análogos para fins militares, tecnológicos, etc (Priberam, 2017).

Design

Design ou projeto é um conjunto de fases que visa o desenvolvimento de uma aeronave viável. As fases do projeto são: projeto concetual, preliminar e detalhado. No projeto concetual determina-se um conceito viável que é otimizado. No preliminar, são feitas mais iterações para seleção de materiais, dimensões, estruturas e funções do projeto. São realizadas simulações e construídos modelos físicos para teste. No projeto detalhado, o projeto é descrito detalhadamente, os processos de fabrico planeados e o produto é preparado para a produção. Desenhos detalhados, listas de material e estimativas de custo são apresentados. Por norma, constrói-se um protótipo para ensaios. Baseado em Gamboa (2014).

Design generativo

O *design* generativo é uma tecnologia que imita a abordagem evolutiva da natureza e a aplica ao *design*. Depois de estabelecidos os objetivos de *design*, exploram-se todas as permutações possíveis de uma solução para encontrar a melhor opção. O *software* de *design* generativo analisa rapidamente milhares - ou mesmo milhões - de opções de *design*, teste de configurações e estabelece para cada iteração, o que funciona ou não. O processo permite ao *designer* gerar novas opções, para chegar ao *design* mais otimizado. O *design* resultante é uma *lattice structure* que parece aleatória, mas é otimizada para ser resistente, leve e para usar a menor quantidade de material possível. Inclui o processo de otimização de topologia, que usa o método dos elementos finitos (Autodesk, 2017).

Hype Cycle

Um *Hype Cycle*, representado na Figura 1 é a forma gráfica de representar a maturidade e a adoção de determinadas tecnologias e é representado por 5 fases:

- ***Innovation Trigger***: há um potencial avanço tecnológico numa determinada tecnologia. As primeiras histórias e o interesse dos media geram publicidade. Muitas vezes, não existem produtos utilizáveis e a viabilidade comercial não está comprovada.
- ***Peak of Inflated Expectations***: a publicidade inicial produz uma série de histórias de sucesso - muitas vezes acompanhadas por uma série de falhas. Algumas empresas partem para a ação; muitas não.
- ***Trough of Disillusionment***: o interesse diminui à medida que as experiências e implementações falham. Os produtores da tecnologia mudam a estratégia ou falham. Os investimentos continuam apenas se os fornecedores que restarem melhorarem os seus produtos de forma satisfatória para os adotantes da tecnologia.
- ***Slope of Enlightenment***: surgem mais exemplos de como a tecnologia pode beneficiar a empresa e a haver um entendimento mais geral da tecnologia. Aparecem produtos de segunda e terceira geração. Mais empresas financiam projetos. As empresas conservadoras continuam cautelosas.
- ***Plateau of Productivity***: a tecnologia passa a ser aceite de forma abrangente, torna-se mais estável e já se vislumbra uma geração seguinte mais evoluída (Gartner, 2017).

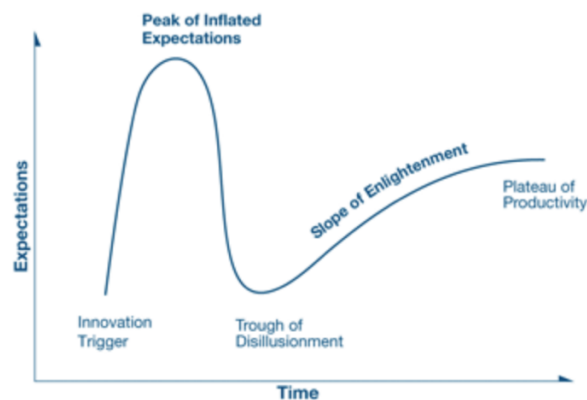


Figura 1 - *Gartner Hype Cycle* (Gartner, 2017).

JIT

Just in time é uma estratégia de inventário que as empresas utilizam para aumentar a eficiência e diminuir o desperdício, usando apenas os bens necessários no processo de produção, reduzindo assim os custos de armazenamento. Este método exige que os produtores prevejam a procura com precisão (Investopedia, 2017).

Manufatura Avançada

Segundo a UE, inclui todas as soluções de produção que melhorem a produtividade (velocidade de produção, precisão de operação e consumo de energia e materiais) e / ou para melhorar o desperdício e a poluição da produção industrial tanto em setores tradicionais como em indústrias emergentes (European Commission, 2014).

Manufatura Direta/Rápida

Produção de peças de uso final que podem ser utilizadas depois de processos de acabamento. (DMRC, 2016).

Manufatura Subtrativa

Manufatura de produtos através da remoção de material (por exemplo, fresagem, perfuração, corte por abrasão, etc) de um volume sólido a fim de obter a forma desejada, em oposição à manufatura aditiva (ASTM, 2012).

MCRL

Manufacturing Capability Readiness Level é análogo ao termo TRL, mas referente à capacidade produtiva (AM Platform, 2014).

Near-net-shape

Caracteriza-se por produzir componentes, desde o início, o mais parecido possível com a sua forma e contorno da peça final (Cominotti & Gentili, 2008).

Processos de acabamento

Refere-se aos estágios (geralmente manuais) de finalização das peças, que variam conforme a aplicação que o produto vai ter. Os processos específicos usados para melhorar os componentes produzidos por MA ou superar as suas limitações incluem: 1) Remoção do suporte de material; 2) Melhorias na textura da superfície; 3) Melhorias na precisão (dimensional); 4) Melhorias estéticas; 5) Preparação para uso como molde; 6) Melhoria das propriedades usando técnicas não-térmicas (por exemplo, através da infiltração de outro material); 7) Melhoria das propriedades pelo uso de técnicas térmicas (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Prototipagem rápida

Produção de protótipos que se assemelham à peça final no *design* ou função, mas não têm as mesmas propriedades da peça (DMRC, 2016).

Rapid Tooling

Produção de ferramentas ou peças de produção, por exemplo, moldes com canais de refrigeração (DMRC, 2016).

Razão *buy-to-fly*

Razão entre a massa de matéria-prima usada para manufaturar um componente e a sua massa final (SmarTech, 2014).

Reparação rápida

Reparação de peças desgastadas, por exemplo, através da adição de material (DMRC, 2016).

TRL

Technology Readiness Level é uma escala, representada na Figura 2, que determina a maturidade de uma tecnologia (KTN, 2012).

Technology Readiness Level (TRL)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Activity	Discovery & Research		Innovation					Commercialisation	
TRL Description	Basic principles observed and reported	Concept of application formulated	Experimental proof of concept	Concept or process validated in laboratory	System or component validated in relevant environment	System model or demonstrator in relevant environment	System prototyping demonstrator in an operational environment	Actual system completed and qualified test & demo operational environment	Actual system mission-proven in successful mission operation

Figura 2 - Definição dos graus de TRL (KTN, 2012).

WIP

Work-in-Process refere-se a produtos inacabados que ainda estão a ser fabricados ou em fila de espera (InvestingAnswers, 2017).

Capítulo 3 - Estado da Arte

3.1. Definição de MA

Manufatura Aditiva (MA) é definida pela *ASTM International* (2012) como: processo de adição de materiais para produzir objetos a partir de um modelo 3D, geralmente camada a camada, em oposição às metodologias de fabricação subtrativa.

Outros termos sinónimos são: *Freeform Fabrication; Additive Layer Manufacturing; Rapid Manufacturing; Constructive Manufacturing; Direct Digital Manufacture*.

Atualmente, o termo Impressão 3D identifica-se mais com bens de consumo e aplicações para casa.

3.2. Evolução da MA

”3D printing is the dream of any engineer. You have an idea, you print overnight and the next morning you have a new part in your hands.” (Rainer Rauh, Gestor de inovação da Airbus)

O *Gartner Hype Cycle* de 2010, representado na Figura 3, evidencia que a MA apareceu pela primeira vez com uma estimativa para a maturidade de entre 5 a 10 anos. Em 2013, conforme a Figura 4, surgiram aplicações na indústria, situadas na *slope of enlightenment*, onde começam a surgir produtos da segunda e terceira geração.

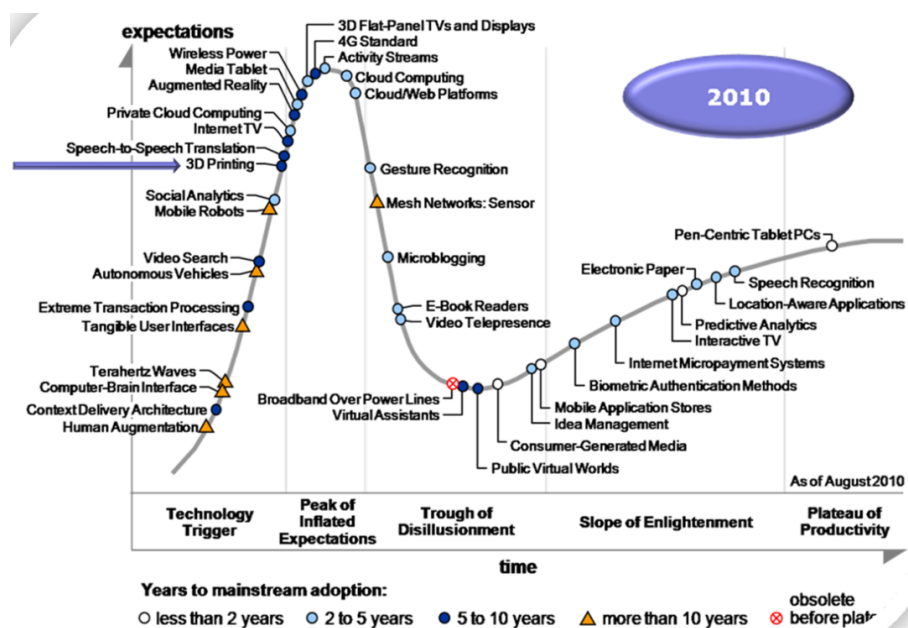


Figura 3- *Gartner Hype Cycle* de 2010 (European Commission, 2014).

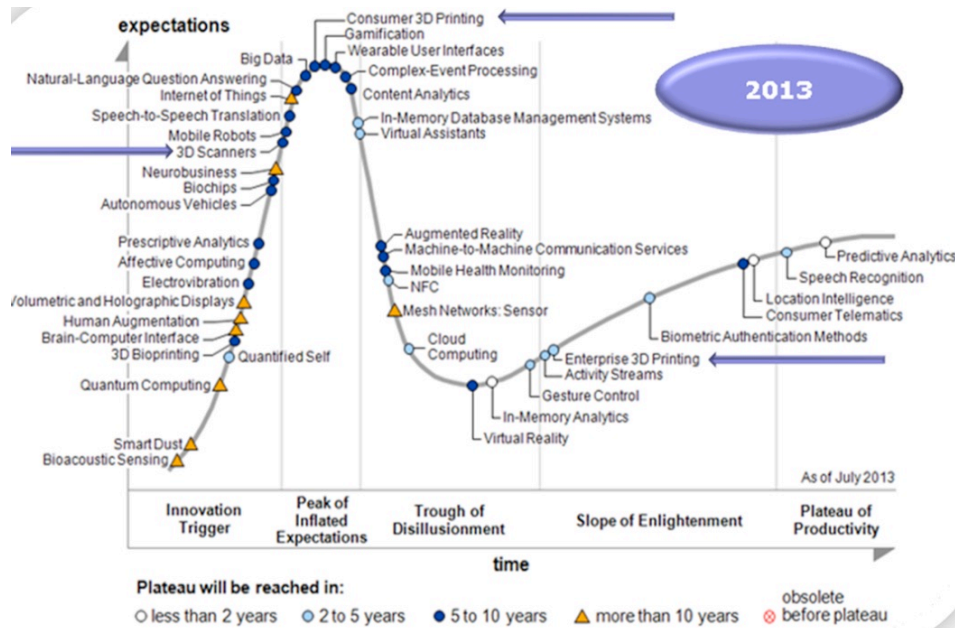


Figura 4 - Gartner Hype Cycle de 2013 (European Comission, 2014).

O Hype Cycle de 2015 relativo exclusivamente à impressão 3D é o da Figura 5, onde se verifica que a impressão 3D usada para prototipagem já se encontrava no último estágio deste tipo de gráfico e que a impressão 3D para atividades de manufatura se encontrava entre os estágios *peak of inflated expectations* e *trough of disillusionment*.

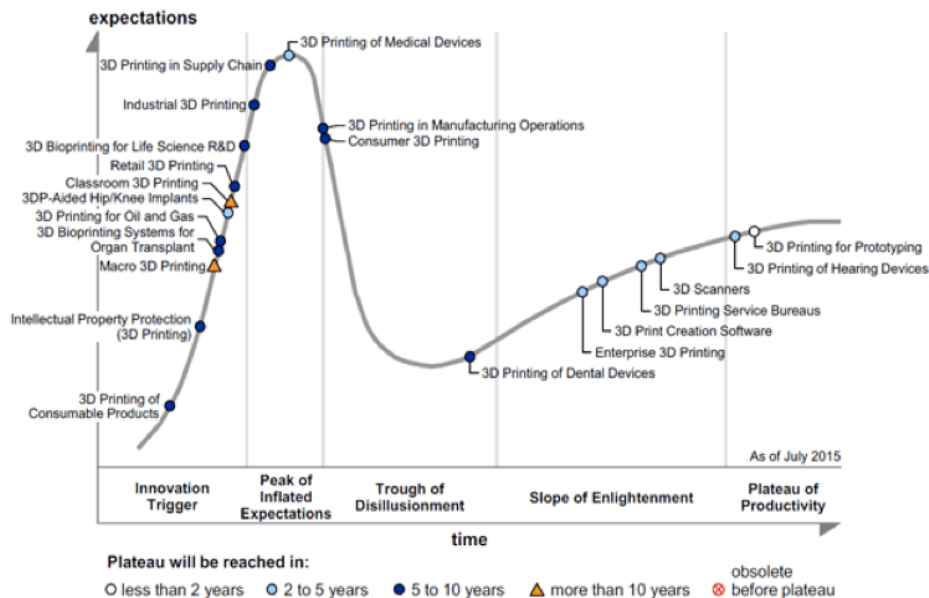


Figura 5 - Gartner Hype Cycle para a Impressão 3D de 2015 (All3DP, 2015).

De acordo com o *Direct Manufacturing Research Center* (DMRC) (2016), a MA pode ser subdividida nas 4 seguintes aplicações: Prototipagem Rápida, *Rapid Tooling*, Reparação Rápida e Manufatura Direta/Rápida.

Um estudo do mesmo centro de pesquisa, compreendendo 51 empresas que já utilizavam a MA ou que estavam a planear usar, consistiu numa avaliação no sentido de se perceber que aplicação usavam e/ou esperavam usar no futuro. Apenas 4% das empresas eram do ramo aeronáutico. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 6. Concluiu-se que as empresas que ainda não usavam MA à data, futuramente, teriam mais interesse em *Rapid tooling*, havendo a maior discrepância entre presente/futuro, nessa aplicação. A manufatura direta também aumentará o número de admiradores em relação aos dados contemporâneos ao estudo.

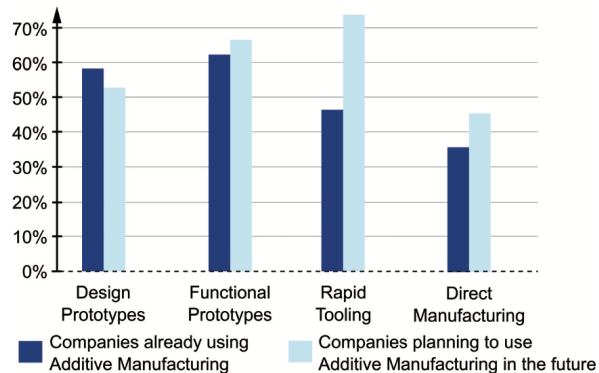


Figura 6 - Aplicações da MA segundo o estudo do DMRC (DMRC, 2016).

Uma publicação da consultora *Wohlers* (2011) remete para um outro relatório seu de 2010, no qual 71 fornecedores de serviços e fabricantes de sistemas de MA em todo o mundo responderam a uma pesquisa realizada por esta. O resultado está na Figura 7. Essas empresas acreditavam que em menos de 4 anos, 35.9% do seu negócio seria de MA. E que em menos de 10 anos, seria cerca de 50%.

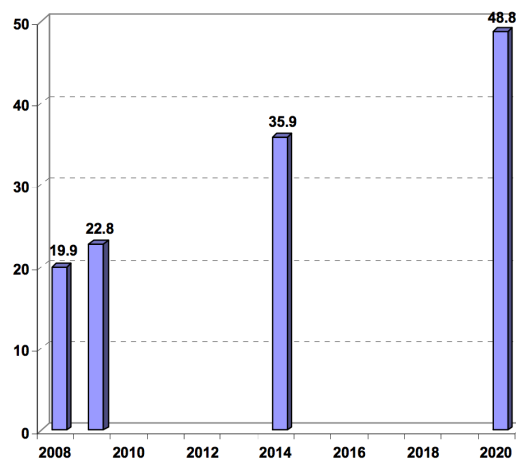


Figura 7 - Percentagem estimada do uso da MA na produção de peças (Wohlers Associates, 2011).

3.3. O Setor Aeroespacial

De acordo com a consultora *Ernst & Young* (2016), a Figura 8 evidencia que a aplicação da impressão 3D é dominada pelo ramo aeroespacial, prevendo-se que continue a ser, futuramente, o ramo com maior potencial.

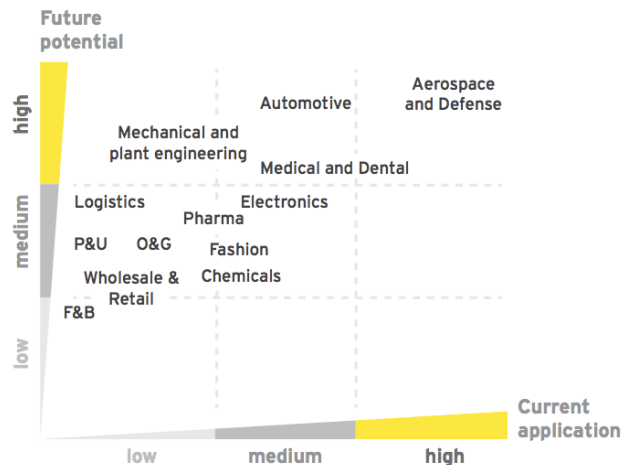


Figura 8 - Aplicação atual e potencial futuro da Impressão 3D na indústria (Ernst&Young, 2016).

A indústria da MA no mercado aeroespacial tem tido um crescimento impressionante, que vai continuar. Quem o diz é outra consultora, a única dedicada exclusivamente a esta tecnologia, a SmarTech, que publicou uma previsão, representada na Figura 9.

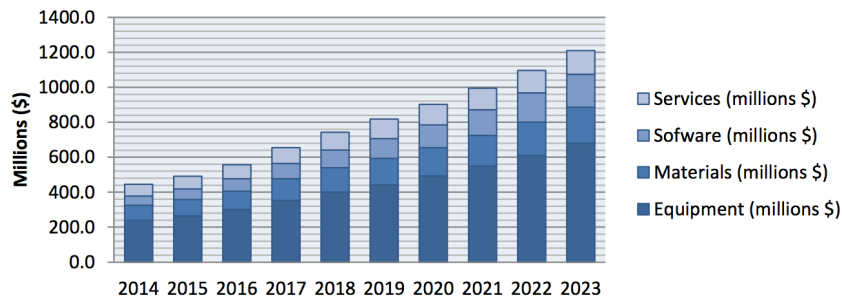


Figura 9 - Previsão de crescimento da MA no setor aeronáutico (SmarTech, 2014).

O futuro da produção de aeronaves é descrito por 13 fatores-chave, segundo um estudo do DMRC (2011) e que estão representados na Figura 10.

O cenário do ramo é caracterizado através da personalização individual do interior das aeronaves assim como para o *design* orientado para a funcionalidade, ao invés de ser orientado para a manufatura, tal como explicado mais à frente. Também, de acordo com outro estudo do DMRC (2013), a cooperação entre fabricantes e fornecedores da indústria aeronáutica melhorou significativamente através de parcerias. Mais autonomia foi transferida dos fabricantes de aeronaves para os seus fornecedores, já que estes contribuem com as suas ideias para a

resolução de problemas e desenvolvimento de todos os componentes sob constante consulta com os fabricantes.

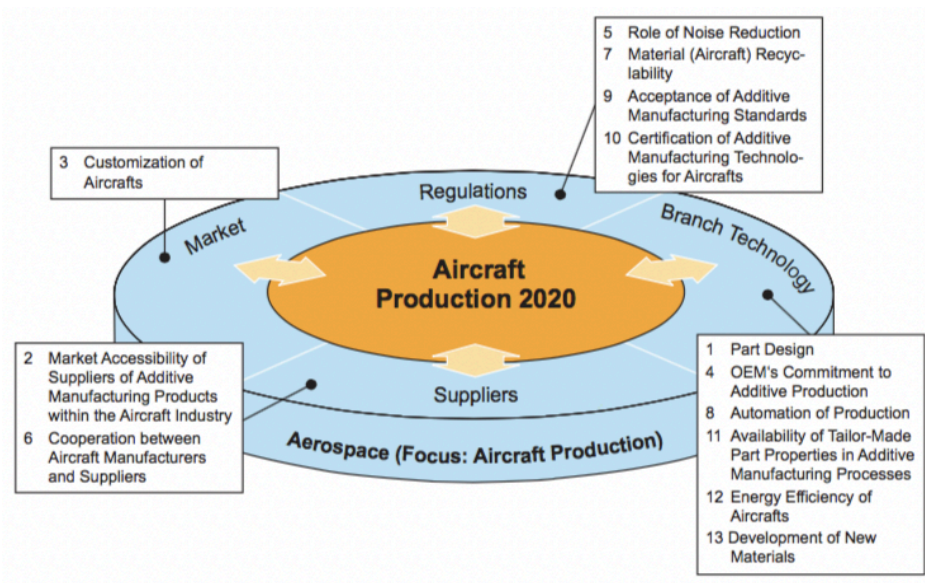


Figura 10 - Fatores-Chave na produção aeronáutica (DMRC, 2011).

3.3.1. Benefícios da MA

“These technologies will ultimately revolutionise the way we design and build aircraft, enabling improvements in fuel efficiency, passenger comfort and a drastic reduction in the environmental footprint of air transport overall”

Peter Sander, dos Conceitos e Tecnologias Emergentes da Airbus.

Da MA podem retirar-se várias vantagens para uma grande gama de aplicações, sendo elas de cariz social, económico e ambiental numa estratégia de desenvolvimento sustentável. Veja-se o exemplo do projeto *Atkins*, no qual um componente foi redesenhado para otimização das suas linhas de fluxo interior e redução do peso por SLM (explicado posteriormente). Quando produzidas 100 mil peças, foi provada a poupança de 503 toneladas de CO₂, 23 toneladas de água, 157 toneladas de matéria-prima e 640 kg de matérias perigosos (Wohlers Associates, 2011).

No estudo mais recente do DMRC (2016) foram identificadas várias capacidades-chave da MA, tais como:

- (1) **Estruturas complexas** utilização de métodos de otimização numérica como otimização da topologia para minimizar a quantidade de material nas peças. O resultado destas otimizações geralmente assemelha-se a princípios conhecidos da biologia;

- (2) **Integração funcional:** significa construir numa peça única aquilo que é normalmente feito em várias partes separadas, incluindo componentes funcionais como molas, articulações ou atuadores pneumáticos;
- (3) **Design leve:** dada a capacidade de produzir estruturas novas completas, o material desnecessário pode ser “eliminado”;
- (4) **Conformal cooling:** integração de canais de refrigeração em áreas, antes, inacessíveis;
- (5) **Redução de resíduos:** as técnicas de MA permitem quase um desperdício nulo do material usado. O restante material tem potencial para ser reciclado;
- (6) **Peças sobressalentes sob procura de tipo *Just in time*:** permite a redução do inventário de peças que por vezes são armazenadas durante longos períodos de tempo, reduzindo-se, assim, a energia que seria usada no transporte e no embalamento;
- (7) **Flexibilidade de *design*:** sendo um processo digital até à construção da peça em si, e não havendo a necessidade da produção de ferramentas de peças simples e/ou de protótipos para essa construção, é possível fazer alterações de última hora na geometria da peça;
- (8) **Prototipagem rápida:** a produção rápida de protótipos permite um *feedback* mais rápido por parte do cliente e beneficia os que têm exigências voláteis. Materiais de alta resistência são capazes de criar protótipos funcionais para verificar os requisitos nas fases iniciais do processo de desenvolvimento;
- (9) **Personalização:** permite gerar partes personalizadas, sem custos de manufatura adicionais;
- (10) **Reparação de peças;**
- (11) **Reconstrução de peças que deixaram de ser produzidas:** havendo o modelo digital da peça, esta pode ser impressa;
- (12) **Prazos de entrega curtos:** a MA consolida vários passos do processo de fabrico num único, o que reduz o tempo total de fabrico. Serão apresentados exemplos posteriormente.

Entre outros pontos importantes encontram-se: uma razão *buy-to-fly* reduzida; cadeia logística mais eficiente e é uma produção industrial avançada com uma pegada ecológica sustentável relativamente ao custo e recursos, pois há uma redução dos custos operacionais e de produção, embora o processo em si seja um processo intensivo de energia.

Para além disto, a MA respeita o conceito *lean* e *agile*, na medida em que, respetivamente, é um método que reduz desperdícios tanto de material como suprime estágios de produção e que reduz os prazos de entrega, mesmo havendo uma volatilidade na procura em termos de volume e variedade. Pode-se então considerar a MA capaz de estabelecer uma cadeia de valor *leagile*, a qual se caracteriza por menos desperdício, maior flexibilidade e reconfiguração, redução do stock e de WIP e uma política de JIT.

3.3.2. Barreiras

As barreiras à implementação da MA dependem dos fatores específicos da aplicação. Por exemplo, as barreiras para a introdução de componentes em motores são diferentes daquelas para a introdução de componentes na cabine, pois o ambiente operacional, especificações de produtos e materiais envolvidos são bem diferentes. No entanto, em termos gerais, há vários fatores identificados como barreira.

Num artigo da revista *Aviation Maintenance* (2017), funcionários da FAA afirmaram que a MA é uma tecnologia relativamente recente com pouca experiência no campo em produção de grande escala em aplicações na aviação comercial. Referem vários fatores de risco como o elevado número de parâmetros a ser controlados durante o processo de construção por MA, potenciais defeitos, a ausência de métodos de inspeção não destrutivos aceites e validados e a falta de especificações e normas dos processos e materiais a usar em MA.

Numa entrevista publicada noutra edição da mesma revista (2017), a *KLM Engineering & Maintenance* afirma já usar a MA principalmente na produção rápida de protótipos e conta em utilizá-la para redução do seu inventário, principalmente de peças sobressalentes com pouca procura. No entanto, para as peças OEM, a KLM está a discutir com os OEM o futuro da cadeia de abastecimento: um dos fatores discutido é como será feito o processo do rastreamento de peças impressas na KLM, assim como o processo de licença entre o OEM e o local de manutenção de forma a que este último tenha autorização para a impressão da peça. A *FL TECHNICS* e a *Lufthansa Technik* identificaram a falta de normalização dos materiais compatíveis com as máquinas de MA. A *Gulfstream* e a *JSSI* referem a falta de regulamentação e controlo de qualidade como oposição ao desenvolvimento. A *Lufthansa Technik* acrescentou ainda que especialistas que combinem conhecimento aeroespacial com o conhecimento de MA ainda são raros.

Segundo um estudo inglês pela *KTN Materials* (2012) foram identificadas como principais barreiras ao uso da MA, no Reino Unido, os seguintes fatores: custo dos componentes demasiado elevado; processo imaturo e ainda não suficientemente rápido para suportar um grande volume de produção e escolha limitada de materiais compatíveis para MA.

Entre os fatores que contribuem para o custo elevado estão a matéria-prima cara, a velocidade de construção nos processos que é baixa, o tamanho limitativo das máquinas disponíveis e o elevado investimento inicial em máquinas. Por enquanto, a MA é economicamente mais viável face aos métodos tradicionais, quanto maior for a personalização do produto e menor for o volume de produção - se for usada na produção de volumes grandes, o preço aumenta, segundo Aliakbari (2012). Uma maior personalização da peça implica por norma maior complexidade, a qual, usando métodos tradicionais exige o uso de ferramentas como moldes, por exemplo, que são o fator mais caro no processo de produção. Por outro lado,

a produção de ferramentas para usar posteriormente na produção da peça, nos métodos tradicionais apenas compensa para produção em grande escala pelo que, para pequenas escalas de produção, a MA é mais económica. O gráfico da Figura 11 representa a relação entre custo e complexidade da peça.

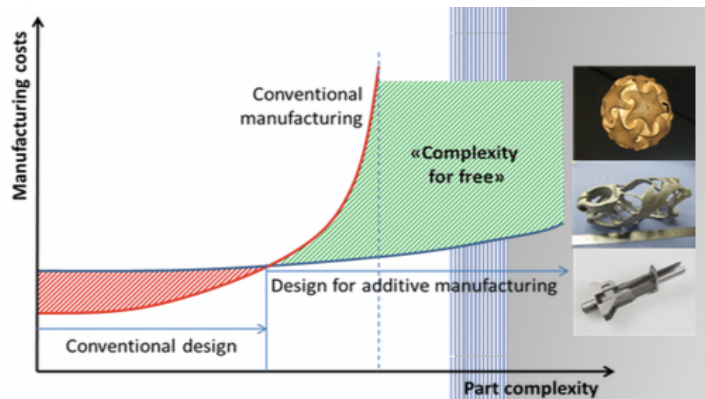


Figura 11 - Complexidade sem custo (European Commission, 2015).

O estudo da *KTN Materials* (2012) refere ainda poucos métodos de monitorização e controlo do processo, incompatibilidade entre as máquinas e materiais. Quanto à imaturidade do processo, refere o nível baixo de TRL de algumas aplicações como PBF para metais, informação limitada acerca do desempenho de componentes de MA, dos materiais usados e dos parâmetros do processo, falta de normas para materiais compatíveis para MA e respetivos processos, cadeias de abastecimento não maduras para o processo e existência de poucos fabricantes de sistemas de MA. Ainda o facto dos *designers* não explorarem todas as possibilidades geométricas possíveis com a MA, pois não têm ainda a experiência necessária com esta tecnologia emergente. Há ainda a necessidade de processos de acabamento, já que a superfície dos materiais tem tendência a ficar rugosa.

De acordo com a CE (2014) e o DMRC (2016), em relação ao desenvolvimento de materiais para a MA, há uma necessidade de materiais com melhor desempenho. Hoje, apenas alguns materiais são adequados para MA. Por exemplo, produtos que consistam em materiais como o vidro não são fabricados com tecnologia MA. Por ser uma tecnologia emergente, é importante perceber ainda propriedades como, por exemplo, propriedades isotrópicas, rigidez, resistência, fadiga e fluência. Uma base de dados comum para ser possível comparar os testes entre materiais diferentes e máquinas precisa ainda de ser desenvolvida.

Também se aponta o espaço de construção dos sistemas MA como uma limitação, pelo que a dimensão da peça é limitada ao espaço de construção das máquinas de MA, obstáculo que será superado pelos futuros fornecedores de máquinas. Máquinas como SLM500HL com um espaço de construção de 500x280x365 mm³ ou EOSINT P800 com 700x380x560 mm³ constituem uma limitação para a criação de peças (DMRC, 2016).

Em relação ao TRL, o relatório da *AM Platform* (2014), refere que a maioria dos componentes considerados na manufatura aeroespacial estão no nível TRL 4-6. A reparação e manutenção para a indústria aeroespacial é uma atividade de alto valor acrescentado e é prontamente aplicada na produção (isto é, TRL9). No entanto, a capacidade de engenharia reversa de uma secção para determinar os requisitos de reparação e, posteriormente, aplicá-los está atualmente em TRL 5-6. O suporte adicional das tecnologias de CAD, desenho assistido por computador, e de tecnologias de testes não destrutivos (para fins de validação e certificação) também é necessário para aprimorar as capacidades de reparação, digitalização (*scanning*), projeto e análise.

O nível TRL 4-6 é conhecido como o *valley of death* (AM Platform, 2014). Uma publicação da *Rolls-Royce* reporta que empresas e países que não ofereçam fundos para suportar estes níveis de TRL podem ficar em desvantagem competitiva. Também relata que “um processo de manufatura requer desenvolvimento para que os produtos finais possam ser fabricados economicamente, em volume e com qualidade consistente”. Para que isso aconteça, TRL e MCRL devem ser geridos juntamente para não se desperdiçar investimento ou atrasar a entrada no mercado.

Um outro facto indicado pela CE (2014), foi que “um dos problemas atuais é, contudo, muitas das empresas não serem conhecedoras do seu (MA) potencial.”

Relativamente ao investimento e à própria organização da empresa, é referido num documento da CE (2014) que, pesquisas concluíram que mesmo quando existem condições para investir, os produtores/fabricantes tendem a priorizar o investimento na inovação do produto e não no processo produtivo. As pesquisas mostram que a importância dada pelas empresas à liderança do produto como fonte de diferenciação competitiva é de 58%, enquanto que à liderança do processo produtivo é de 32%. O investimento em processos produtivos inovadores tem uma prioridade baixa por não serem considerados como geradores de receitas imediatas. No entanto, há o risco de que um subinvestimento na inovação do processo conduza a um processo de produção obsoleto.

Por outro lado, o Comité Económico e Social Europeu (2013) refere que “a inovação afeta muitas áreas, pois cria uma nova dinâmica nas empresas e no local de trabalho: redesenhar os métodos de produção atuais, reestruturar operações obsoletas, desenvolver as cadeias de valor e os novos «setores», suprimir as fronteiras entre indústria e serviços. A inovação é sinónimo de modernização e criatividade na sociedade e deve ser comunicada como tal.”

3.3.3. Normalização

“AM perfectly matches the challenges of light weighting in the aerospace industry. The industry already invests heavily to qualify AM for production purposes. Even though this will still take a lot of time and effort, the impact will be huge”.

Jörg Lenz, Coordenador de projetos na EOS GmbH, presidente do ISO/Comité técnico 261.

Segundo dois relatórios da *AM Platform* (2014), (2015) , há uma lacuna entre o conhecimento e capacidade tecnológica obtidos pela investigação e os requisitos atuais para a introdução no mercado de novos produtos e tecnologias.

Esta ponte deve ser feita pela normalização. As normas irão apoiar as possibilidades de certificação e aprovação das aplicações na aviação, o que criará confiança nos diferentes *stakeholders* associados ao desenvolvimento de produtos recorrendo a MA. A sua ausência limita o avanço da MA no setor. Mas a indústria começa a responder a esta necessidade a nível global e foram criados vários fóruns de comissões.

O projeto SASAM, apoiado pelo FP7 (abordado mais à frente), visa impulsionar o crescimento da MA, integrando e coordenando atividades de padronização para a Europa. Neste seguimento, foi estabelecida uma cooperação entre a ISO e o CEN. Por outro lado, o acordo de Viena permite a aprovação ao mesmo tempo das normas europeias e internacionais. Suportando a ideia do *Industrial Landscape Vision* (ILV- abordado mais à frente), a estes dois órgãos juntou-se a ASTM.

Os comités relacionados com a MA são ISO TC261, ASTM F42 e CEN/TC 438, cujo objetivo é determinar normas para processos, termos e definições, cadeias de processos, procedimentos de teste, parâmetros de qualidade e contratos de fornecimento para, posteriormente, desenvolver um *roadmap* comum e a estrutura organizacional das normas MA nos três níveis seguintes:

- **Normas gerais:** especificam conceitos gerais, requisitos comuns ou são geralmente aplicáveis à maioria dos tipos de materiais, processos e aplicações MA;
- **Normas de categoria:** especificam requisitos específicos para uma categoria de material ou categoria de processo;
- **Normas especializadas:** especificam requisitos específicos para um material, processo ou aplicação.

Estes padrões MA foram acordados pela ISO e pela ASTM em julho de 2013, segundo informação do CEN (2015). Estão em esquema na Figura 12. Atualmente já foram publicadas algumas normas pelos três comités.

O projeto SASAM (2015) estabeleceu o *roadmap* da Figura 13, indicando o tempo e tópicos

para a normalização, feito com base nos *stakeholders* entrevistados.

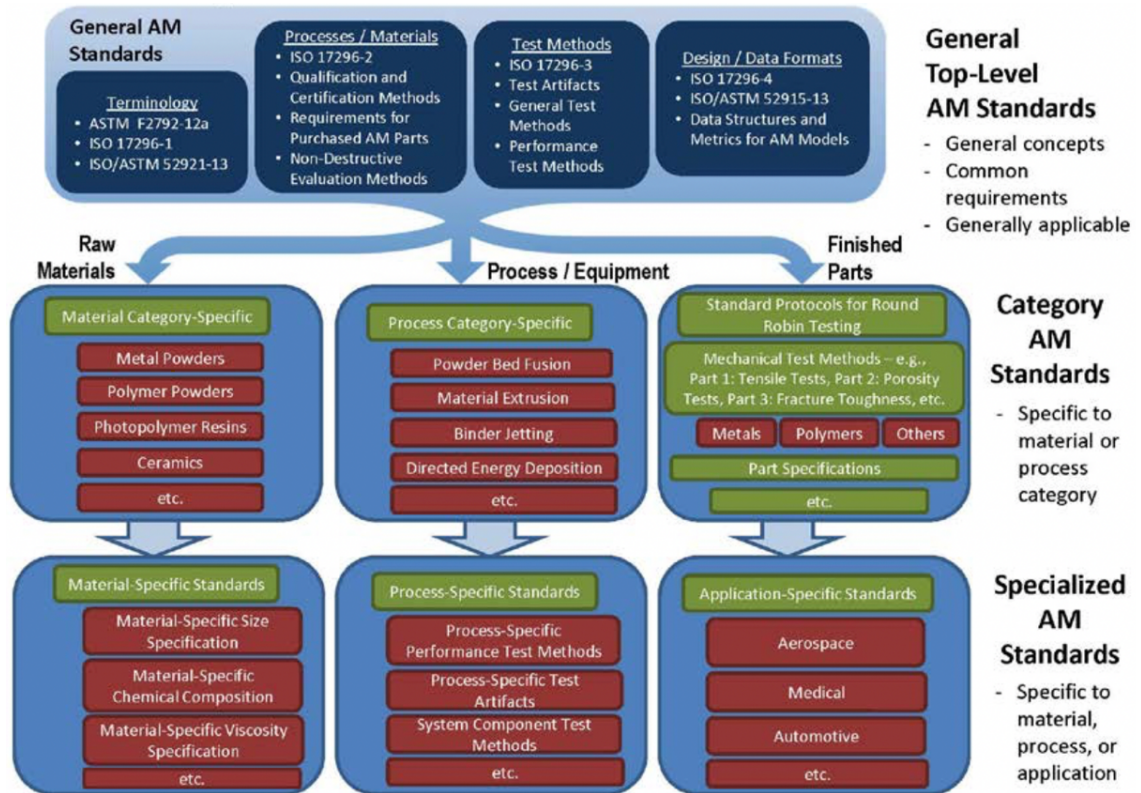


Figura 12 - Estrutura proposta para normas da MA (CEN, 2015) .

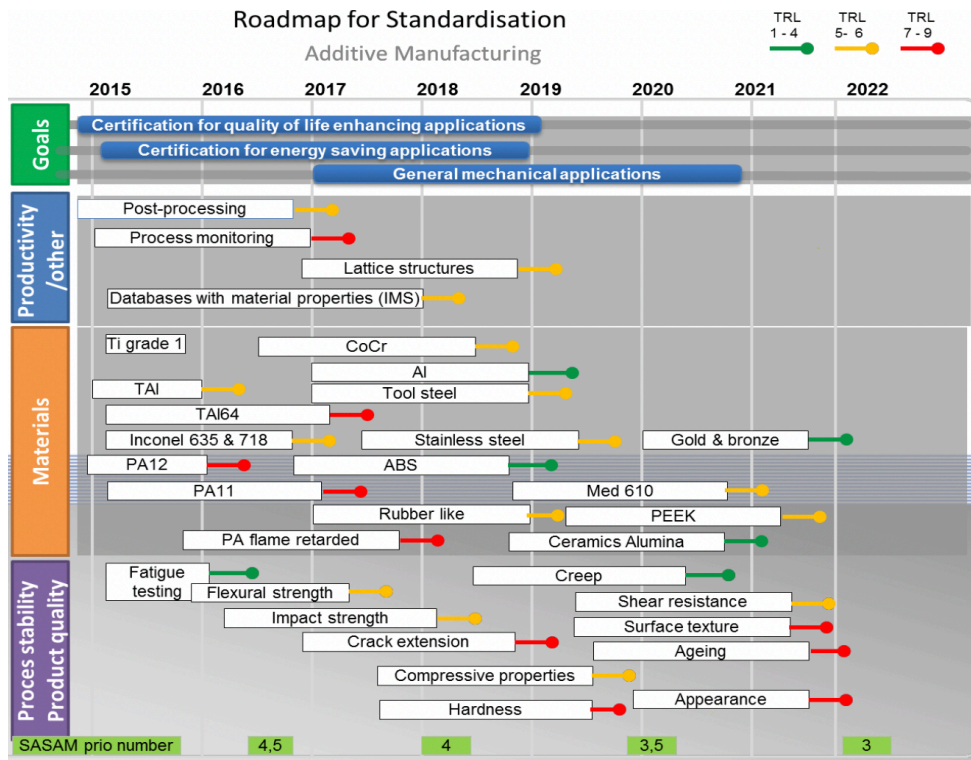


Figura 13 - Roadmap da normalização MA (European Comission, 2015).

No âmbito de um projeto do DMRC (2015), foram metodicamente desenvolvidas e, posteriormente, catalogadas de forma independente normas de projeto para máquinas de SLS, SLM e FDM. O projeto *Direct Manufacturing Design Rules 2.0* (DMDR 2.0) tem como objetivo ampliar o alcance de validade das normas de projeto para diferentes condições de fronteira.

3.3.4. Exemplos gerais de aplicação

Apesar dos obstáculos à implementação da MA, referidos no ponto 3.3.2. Barreiras, e de acordo com informação do relatório *Wohlers* de 2015, citada num resumo desse mesmo relatório (2015), quase todos os grandes OEM de aeronaves, incluindo a *Airbus*, *Bell Helicopter*, *GKN Aerospace*, *Honeywell*, *Lockheed Martin*, *MTU Aero Engines*, *Northrop Grumman*, *Pratt & Whitney*, *Raytheon*, e *Rolls-Royce* construíram infraestruturas dentro das suas empresas para avaliar e implementar tecnologias de MA.

Na indústria aeronáutica, segundo Kobryn, Ontko, Perkins, & Tiley (2006), a MA tem quatro principais aplicações: a manufatura e reparação de componentes, a manufatura de ferramentas (tooling) e reparação.

A consultora *SmarTech* (2014) refere a MA como estando a ser mais usada na fabricação de componentes estruturais secundários, que são aqueles cuja falha afeta a operação da aeronave mas não a sua integridade estrutural (Gamboa, 2014). Um artigo da revista *Aviation Maintenance* (2017) diz que algumas peças de motor impressas foram aprovadas, mas a MA é principalmente usada em prototipagem e peças plásticas.

3.3.5. O Caso Europeu

“In short, Europe’s recovery and future prosperity depend on our ability to innovate, to bring together research, innovation and education, and to turn new ideas into products, services, jobs and well-being for our citizens.”

José Manuel Barroso, antigo Presidente da CE em Bruxelas, 8 de maio de 2012

O ILV 2025, esquematizado na Figura 14 é um estudo que tem uma visão holística para entender a complexidade do sistema industrial, as suas inter-relações e reações. O estudo do *Joint Research Centre* da CE (2013) baseou-se na análise da importância e do potencial impacto da sociedade, da tecnologia, da economia, do ambiente e da política (STEPP) na indústria. É um modelo qualitativo que detalha os fatores de mudança que influenciarão o futuro sistema de produção e consumo em 2025. Ele também introduz uma mudança de paradigma da

descrição setorial tradicional do sistema industrial para uma representação mais baseada na funcionalidade.

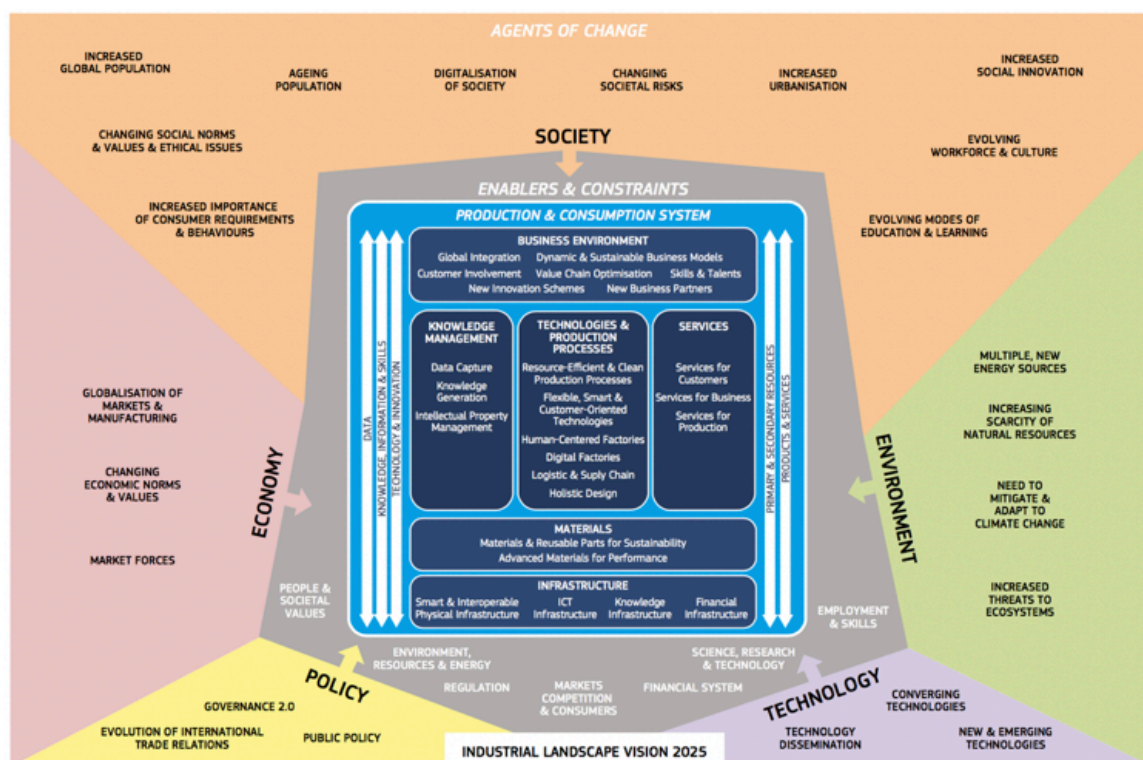


Figura 14 - *Industrial Landscape Vision 2025* (Scapolo, et al., 2014).

Um relatório da CE (2014), assinala que em 2025, a informação será o “novo petróleo”. Cada vez mais complexos e grandes conjuntos de dados, suportados por ferramentas analíticas avançadas, permitirão às empresas de manufatura compreender e otimizar todas as etapas das suas cadeias de valor, desde o projeto até a distribuição, incluindo a gestão da cadeia de abastecimento, os processos de produção e o *marketing*. O resultado será uma manufatura ágil, fomentada por novos processos de produção e tecnologias.

Uma publicação da consultora *Roland Berger* (2014) aponta ter havido uma desindustrialização em países europeus como a Espanha, França e Reino Unido. Para manter serviços de alta qualidade numa área, uma indústria de manufatura inovadora e criativa é crítica. A tendência para a desindustrialização em alguns países europeus coloca a Europa em risco de perder atividades de alto valor e colocar a própria competitividade em risco. Aquando do lançamento da atualização da Política Industrial da UE (Outubro de 2012), a Comissão Europeia estabeleceu o objetivo de aumentar a participação da indústria no PIB da Europa de 15% para 20% até 2020. Para isto, a Europa tem que criar €500 mil milhões em valor acrescentado e 6 milhões de empregos. A Indústria 4.0 e as tecnologias de manufatura avançada que ela comporta são uma oportunidade para cumprir esse objetivo, para superar as tendências de desindustrialização enfrentadas por alguns países europeus e para cumprir com os objetivos

da Europa 2020 de redução de 20% das emissões de gases com efeito de estufa.

Com a Indústria 4.0, a procura por serviços altamente qualificados aumentará as atividades para apoiar a indústria da manufatura. No gráfico da Figura 15 foi assumido que os investidores esperam um retorno do capital empregado (ROCE) de 15% como uma média para a indústria europeia. Na área "Indústria tradicional", estão países que conseguem isso com atividades que exigem baixo investimento de capital e produtos de baixo valor acrescentado. Essa caixa contém França, Espanha e Reino Unido.



Figura 15 - Indústria 4.0 vs indústria tradicional em termos de lucros e investimento capital (Dujin, Geissler, & Horstkotter, 2014).

Devido ao subinvestimento ao longo dos anos, os seus ativos industriais perderam progressivamente o seu valor. Portanto, a rentabilidade está em declínio e a competitividade é decrescente. Na área "Indústria 4.0", estão países com processos de produção de ponta. Eles são mais competitivos e têm margens mais elevadas, que pagam as suas necessidades de capital. O gráfico mostra o posicionamento da Europa em geral, bem como da França e da Alemanha em 2012.

A Alemanha está posicionada com um ROCE ainda maior do que 15%. Portanto, o lucro gerado ajudará o país a recuperar o seu capital investido nas futuras tecnologias da indústria. Em contrapartida, a França atualmente ganha margens muito mais baixas da sua indústria, impedindo-a de investir e, assim, recuperar o capital investido.

Se a economia europeia puder atingir uma posição forte dentro da Indústria 4.0, o desinvestimento deixa de ser uma ameaça. A Indústria 4.0 exige investimentos, mas também aumenta substancialmente a produtividade de capital. A economia da Europa será capaz de avançar ao longo desta curva - o que significa que as empresas que investem mais capital serão mais lucrativas.

A Figura 16 representa a relação entre um índice de prontidão para a Indústria 4.0 criado pela consultora *Roland Berger*, o *RB Industry 4.0 Readiness Index*¹⁾²⁾ e a percentagem do PIB relacionado à indústria.

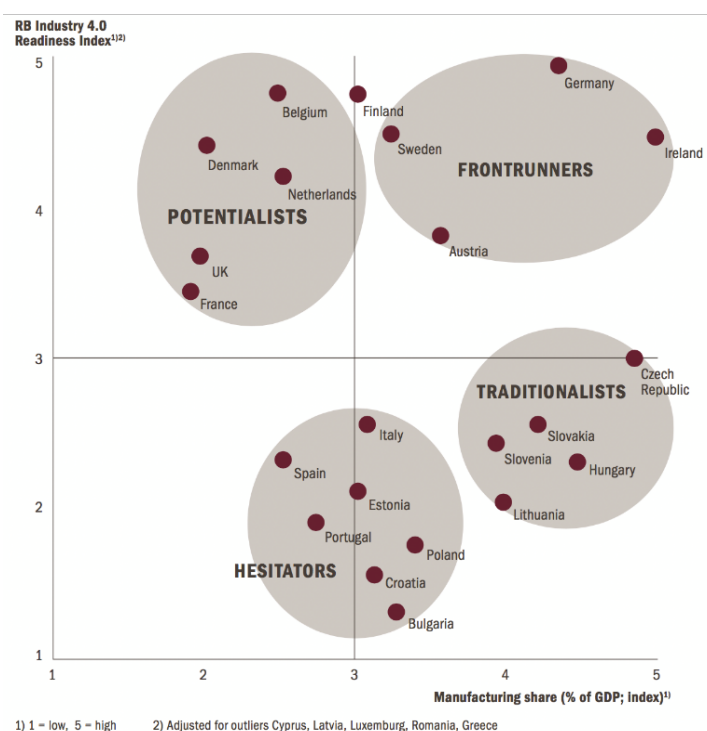


Figura 16 - Condição de alguns países europeus face à Indústria 4.0 (Dujin, Geissler, & Horstkotter, 2014).

A Comissão Europeia (2014) empreendeu uma parceria com os Estados Membros e a indústria, a fim de intensificar consideravelmente os esforços para impulsionar a adoção pelo mercado das tecnologias de fabrico avançadas e dar à Europa uma vantagem competitiva na nova revolução industrial. Políticas nacionais dos Estados Membros para promover modelos de negócio sustentáveis ajudam a consciencializar a indústria sobre processos de inovação sustentáveis.

A MA foi identificada como uma *KET-Key Enabling Technology*, ou seja, uma das tecnologias facilitadoras essenciais, sendo a base para a inovação e uma tecnologia estratégica para o cumprimento dos objetivos propostos. O seu desenvolvimento sustentável requer uma inovação contínua, obrigando a uma investigação consistente e efetiva na próxima década, refere a CE (2014).

A inovação industrial requer uma base tecnológica europeia sólida apoiada por uma coordenação e cooperação transfronteiriças entre institutos de investigação e universidades, tecnologia aplicada e empresas, como assinalado noutro documento da CE (2013).

Programas como o FP, Horizonte 2020 assim como o Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) e parcerias público-privadas disponibilizaram fundos para o seu desenvolvimento. O Banco Europeu de Investimento (BEI) introduziu medidas de fornecimento de financiamento para a manufatura avançada, enaltece um documento da CE (2014).

3.3.5.1. Projetos Europeus

No primeiro *Framework Programme* (FP), entre 1984 a 1987, a MA recebeu fundos da CE (2014). A partir desse momento, o número de projetos relacionados com a MA cresceu constantemente, com uma subida impressionante durante os últimos anos do FP7, o sétimo programa. Neste programa, FP7 (2007-2013), mais de 60 projetos bem sucedidos nesta área foram criados, tendo sido ultrapassado o valor de 160 milhões de euros de fundos da CE e um orçamento total de 225 milhões de euros.

A Figura 17 mostra o crescimento de projetos de MA na Europa. Cerca de 70% dos projetos financiados pelos FPs eram focados nas tecnologias e aplicações, dos quais 3,5% eram para aplicações no ramo aeroespacial.

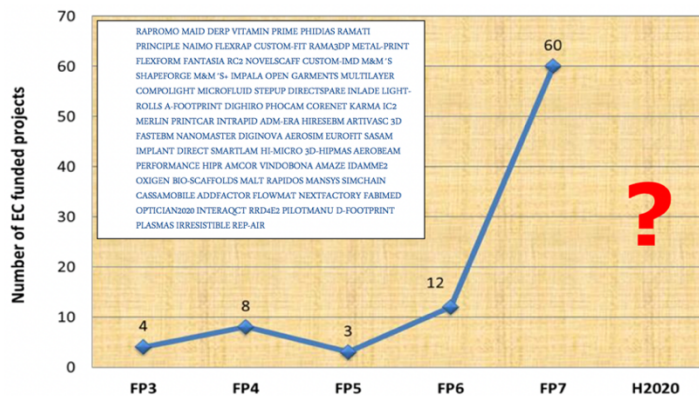


Figura 17 - Projetos de MA na Europa (1991-2013) (Muniz, 2016).

Dois dos projetos criados pelo FP7 foram o REPAIR e o MERLIN.

O projeto REPAIR consiste na pesquisa em reparação e manutenção na indústria aeroespacial usando técnicas de MA. Foi identificada como vantagem a flexibilidade na disponibilidade, permitindo uma manutenção *on-time*. Com um maior nível de automação e menos estágios de produção, há menos custos de pessoal e, portanto, menos custos de MRO (*maintenance, repair and overhaul*). Também os custos de armazenamento serão inferiores,

pois apenas a matéria-prima será necessária armazenar, em vez de haver mais de 3 milhões de peças sobressalentes em armazém, para os vários tipos de avião e fabricante diferente, havendo menos capital imobilizado. Para além disto, dificilmente alguma matéria-prima será desperdiçada ou destruída, sendo sim usada de forma a permitir um novo modelo de negócio sustentável.

O projeto MERLIN visa usar técnicas de MA na produção de motores aeronáuticos civis, de forma a reduzir o impacte ambiental do transporte aéreo. Entre os compromissos deste projeto estão o uso de 100% do material, o não uso de químicos tóxicos e a produção de peças com elevado desempenho de uma forma mais produtiva, consistente, amiga do ambiente e economicamente viável.

Algumas áreas identificadas como precisando de uma melhoria por este projeto foram a produtividade, a otimização do projeto, o desenvolvimento de testes não-destrutivos assim como o desenvolvimento de processos de especificação dos materiais usados.

De acordo com a CE (2014), cerca de 17,6% do orçamento do programa Horizonte 2020 foi destinado à promoção de tecnologias industriais, incluindo a manufatura avançada. Este é o maior programa europeu de sempre de I&D com €80 mil milhões de fundos disponíveis no período 2014-2020.

Olhando unicamente para a evolução do FP7 e para o primeiro ano do H2020, vê-se um elevado aumento de projetos iniciados na MA, de acordo com a Figura 18.

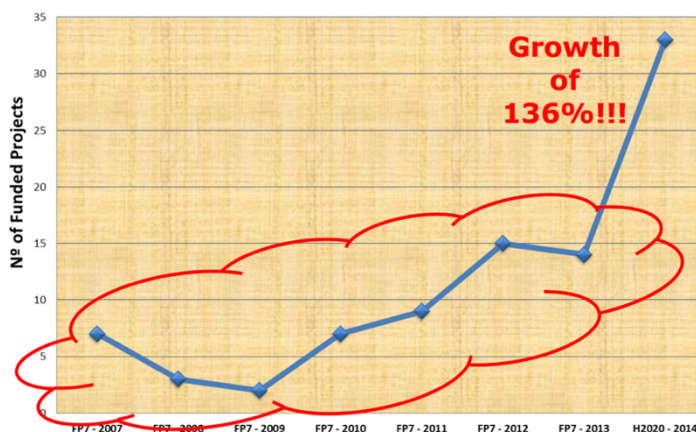


Figura 18 - Projetos de MA na Europa (2007-2014) (Muniz, 2016).

Três dos projetos criados sob o H2020 designam-se EMUSIC, AMOS e AEROBEAM.

O projeto EMUSIC teve início em Abril de 2016. Entre os participantes encontram-se a *Airbus* e a *Rolls-Royce*. O objetivo é desenvolver processos de produção para componentes aeroespaciais especificados pela China e EUA. No final do projeto, os requerentes serão informados do custo dos componentes e conforme a sua avaliação também do produto decidirão

incluir ou não estes produtos nas suas cadeias de abastecimento.

O projeto AMOS -*Additive Manufacturing Optimization and Simulation Platform for repairing and re-manufacturing of aerospace components*, prende-se com processos de MA com potencial para reparações economicamente viáveis de componentes como pás de turbina e trens de aterragem.

O AEROBEAM tem como objetivo produzir pás de estator por EBM (explicado posteriormente) e aumentar o TRL deste método através quer da investigação da reciclagem do pó, quer das propriedades mecânicas das pás de estator em Ti-6Al-4V¹.

Há ainda o projeto *Clean Sky* que é o maior programa europeu de pesquisa que desenvolve tecnologia inovadora e de ponta destinada a reduzir as emissões de CO₂ e outros gases prejudiciais e os níveis de ruído produzidos por aeronaves. O *Clean Sky* contribui para reforçar a colaboração aeroespacial europeia, a liderança e competitividade.

Também a nível ambiental foi estabelecida no *Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) of the Advisory Council for Aviation Research and Innovation in Europe (ACARE)* a necessidade de reduzir as emissões em todas as fases sucessivas do ciclo de vida de uma aeronave, de forma a reduzir o impacto do crescimento da indústria da aviação nos cidadãos europeus. A MA foi identificada como sendo uma solução caso fosse introduzida em todos os estádios do ciclo de vida da aeronave.

Por outro lado, a associação *European Factories of the Future Research Association (EFFRA)* (2013) promove o desenvolvimento de novas tecnologias de produção inovadoras, através de uma parceria público-privada com a UE denominada *Factories of the future (FoF)*. "Fábricas do Futuro" (FoF) reúne recursos privados e públicos através do lançamento de projetos transfronteiriços orientados para o mercado através de uma agenda progressiva de investigação e inovação.

O seu *roadmap* abre caminho para progressos concretos em resposta a desafios, políticas e megatendências europeias (são sete as identificadas pela *Roland Berger*, incluindo globalização e mercados futuros, tecnologia e inovação, etc). Identifica e realiza transformações tendo em vista um conjunto de prioridades de pesquisa ao longo de seis domínios de investigação e inovação, sendo um deles os processos de manufatura avançada, onde se inclui a manufatura aditiva.

A *AM Platform* criou a *AM Strategic Research Agenda (SRA)* para o programa H2020. A SRA elaborou um *roadmap*, cfr Figura 19, que aborda as necessidades técnicas para o desenvolvimento da MA.

¹ Ti-6Al-4V é uma liga de titânio com elevada resistência mecânica, leve e resistente à corrosão.

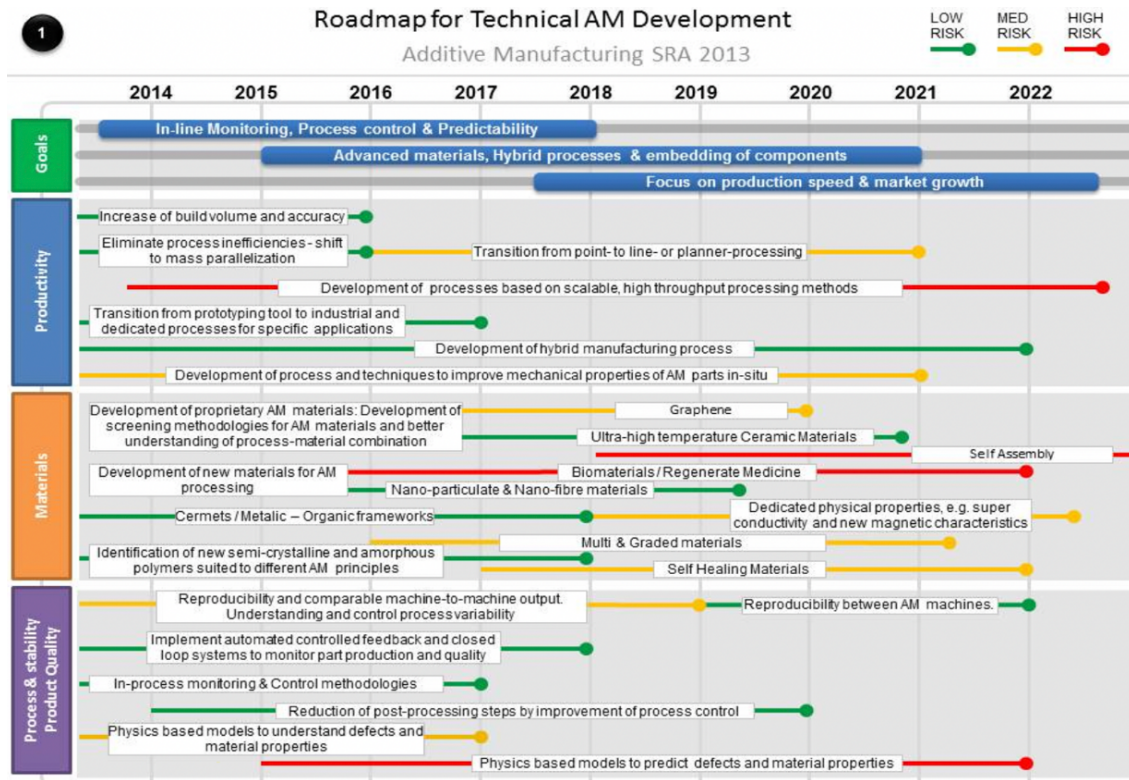


Figura 19 - Roadmap para o desenvolvimento técnico da MA (European Comission, 2014).

A Europa é um dos líderes globais na MA, mas tem perdido vantagem para outras economias que estão a investir no seu potencial. Investimentos por parte dos USA e da China ultrapassarão em pouco tempo os fundos da CE. Israel, Singapura, Coreia, Japão e África do Sul estão também a investir na MA (European Comission, 2014).

Uma das maiores fraquezas da Europa é a dificuldade em converter o conhecimento científico e tecnológico em bens comercializáveis, o chamado *valley of death*, refere a CE (2014).

Seguidamente são apresentados exemplos de componentes produzidos por MA por empresas europeias para o setor aeronáutico.

ALEMANHA

A Alemanha tem uma estratégia baseada numa ligação entre a ciência e a indústria. Há um centro de pesquisa alemão denominado *Direct Manufacturing Research Centre* (DMRC), com sede na Universidade de Paderborn, co-fundado pela Boeing. Foi criado em 2008, e é um centro industrial e académico com o objetivo de desenvolver tecnologias MA. O DMRC angariou 11 milhões de euros para um projeto de 5 anos (AM Platform, 2014). Em consequência, conduziu a pesquisa que investigava áreas de MA e produziu alguns relatórios acerca de indústrias promissoras, como é o caso da aeroespacial (CEN, 2015). Segundo o DMRC (2012), as estruturas de *morphing* e as multifuncionais são aquelas identificadas como sendo os campos de inovação

mais auspiciosos, para além da manufatura sob procura, algo demonstrado na Figura 20, onde os elementos do canto superior esquerdo têm maior probabilidade de vir a acontecer. Para além disso, o estudo apresentou uma dedução dos requisitos para os vários campos de inovação considerados, representados na Figura 21.

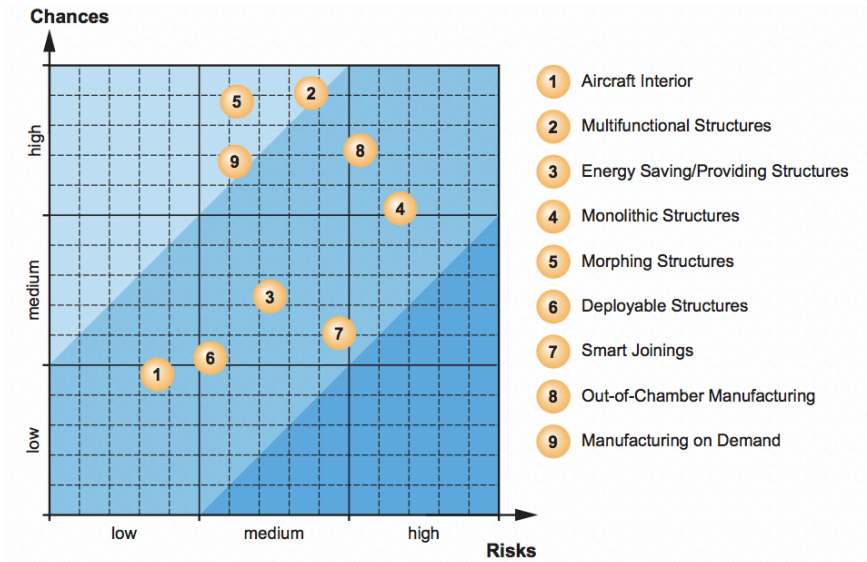


Figura 20 - Campos inovadores prioritários na indústria aeroespacial (DMRC, 2013).

Requirements Matrix Question: "Which requirement (column) does the innovation field (row) impose on DM-technologies?"	Requirements															
	High process stability	Certification	Provision of design rules	On-line quality control	Processability of different materials	Building up on existing structures	Acceleration of AM-processes	Automated integration of AM-processes	Database for properties of AM-materials	Processability of different materials	High dimensional accuracy	Recyclability	Large build chamber volume	...	Integration of electronic circuits	Self-healing materials properties
Innovation fields																
Ai1 – Aircraft Interior																
Ai2 – Multifunctional Structures																
Ai3 – Energy Saving Structures																
Ai4 – Monolithic Structures																
Ai5 – Morphing Structures																
Ai6 – Deployable Structures																
Ai7 – Smart Joinings																
Ai8 – Out-of-Chamber Manufacturing																
Ai9 – Manufacturing on Demand																

Figura 21 - Dedução dos requisitos para os campos de inovação considerados (DMRC, 2013).

Segundo a revista *Aviation Maintenance* (2017), a *Lufthansa Technik* usa cada vez mais a MA para ferramentas e prototipagem, mas também começaram a reparar e substituir peças. O CEO da empresa refere que quando os OEM's começarem a imprimir peças em 3D na sua produção em série, estarão prontos para reparar essas peças com a MA nas suas instalações.

A *MTU Aero Engines* também deu prioridade ao desenvolvimento da MA. O objetivo é

explorar novos projetos, novos componentes - perfis para compressores e turbinas, bem como componentes estruturais - e novos materiais. Usa a MA, por exemplo, SLM (PBF) para produzir *borescope bosses* (ponto de acesso para inspeção visual por endoscopia da turbina) para o motor *Pratt & Whitney's PurePower PW1100G-JM* que equipa a aeronave Airbus A320neo.

REINO UNIDO

A *UK Aerospace Industry* investiu £13 milhões na investigação de MA. Também o governo investiu £30 milhões, refere um documento da CE (2014).

A *Rolls-Royce* aprovou a instalação de uma unidade de produção LMD (explicado posteriormente), para reparar os *turbine seal segments* do motor Trent 500, permitindo economizar custos significativos ao longo do ciclo de vida das suas turbinas.

É também sabido que a *BAE Systems* obteve aprovação da certificação Form 1² da EASA para os tubos de respiração da janela (*window breather pipes*) plásticos. Tiveram um custo 40% inferior face aos produzidos através de moldação por injeção (Deloitte University Press, 2014).

FRANÇA

A empresa *Safran Power Units*, depois de anos de maturação e testes em protótipos, inseriu uma produção em série de peças usando a MA. O motor *Arrano* foi um dos primeiros motores aeronáuticos a usar componentes fabricados através da MA. Esses componentes pertencem ao sistema de injeção de combustível, manufaturados através de técnicas SLM (PBF), cujas principais características são o sistema de arrefecimento e injeção avançada, otimizando a funcionalidade dos componentes durante a operação da aeronave. É produto do programa *Clean Sky*. A MA também foi usada para produzir os *swirlers* da câmara de combustão do motor *Ardiden 3*. Ambos foram produzidos com uma superliga de níquel.

A *Safran* anunciou em junho de 2017 a primeira certificação EASA para um componente APU produzido em MA. O componente certificado é o *turbine nozzle* do eAPU60, manufaturado por SLM (PBF), com o uso de um material à base de níquel, designado *hastelloy X*. A Figura 22 representa o sistema e o componente. O componente é agora 35% mais leve do que o anterior fabricado convencionalmente, sendo composto por quatro peças em vez das oito anteriores. Esta certificação é o resultado de testes intensivos de resistência a temperaturas muito altas.

² EASA Form1 é o certificado emitido por uma organização detentora da certificação POA, onde indica que um produto, peça ou componente foi manufaturado de acordo com os requisitos de design aprovados/não aprovados (EASA, 2017). O seu equivalente pela FAA denomina-se FAA 8130-3.

A Safran (2017) refere que os resultados demonstram que o novo projeto do *nozzle* é adequado para o processo SLM. As propriedades metalúrgicas também estão perfeitamente em linha com os requisitos mecânicos e térmicos para componentes APU de alto desempenho sujeitos a condições extremas.



Figura 22- eAPU60, à esquerda (Safran, 2017); *Turbine nozzle*, à direita (Safran, 2017).

Em 2016 o grupo Airbus apresentou o projeto *Thor* (*Testing High-tech Objectives in Reality*), cfr Figura 23, um UAV composto por cerca de sessenta partes impressas, produzido em menos de sete semanas. A tecnologia convencional apenas foi usada nos dois motores e nos controlos. Tem uma envergadura e comprimento de cerca de 4 metros e foi usado como teste para tecnologias de aeronaves futuristas.



Figura 23 - Projeto THOR (Airbus, 2016).

A Airbus prevê, a curto prazo, uma redução no peso de mais de uma tonelada por aeronave com a introdução da MA. Para obter estes resultados, a MA do alumínio e os processos de *design* específicos e metodologias da MA têm de ser desenvolvidos. Estudos de topologia otimizada e estruturas leves biônicas³ em titânio mostraram até 40% de redução de peso com resíduos de produção menores que 10% do material inicial. Com a introdução de ligas de

³ Estruturas biônicas são estruturas inspiradas nas soluções encontradas pela Natureza relativamente à forma. São obtidas por Design Generativo (*vide* Capítulo 2).

alumínio de alta resistência, é possível uma maior economia de peso, conforme Figura 24. O peso e a redução de resíduos através da introdução de MA reduzirão significativamente as emissões de CO₂ e NO_x, conforme reivindicado pela SRIA. A *Airbus* prevê a criação de aviões inteiros com base em conceitos biomiméticos⁴, o que só pode ser realizado pela utilização da MA em larga escala e promete uma redução de peso de 30%. Um dos projetos da *Airbus* é o *BionicAircraft*, cujo projeto concetual está representado na Figura 25 e na Figura 26.

O projeto do *BionicAircraft* tem como objetivos:

- Aumento da eficiência dos recursos durante a fabricação de aeronaves, através de uma ampla aplicação da MA e melhoria na eficiência dos recursos do seu processo;
- Redução das emissões de gases com efeito de estufa durante a operação da aeronave devido à redução de peso por meio da implementação de estruturas MA biomiméticas de alta resistência;
- Aumento da eficiência dos recursos na manutenção, reparação, revisão e *retrofit*⁵ devido ao desenvolvimento de métodos inovadores de reparação aditiva para estruturas biomiméticas altamente complexas, bem como cadeias de abastecimento inovadoras de MA e logística de peças sobressalentes;
- Redução das emissões provenientes da reciclagem e eliminação devido ao desenvolvimento de métodos de reciclagem para peças de MA.



	conventional milling state-of-the-art	ALM Titanium Ti-6Al-4V (TRL 4)	high strength ALM aluminium (TRL 1)
material	aluminium 7075	ALM titanium (Ti64)	ALM aluminium-lithium "BionicAircraft" development
weight	330 g	191 g	164 g
weight reduction	-	42 %	50 %

Figura 24 - Redução de massa possível com a MA (BionicAircraft, 2017).

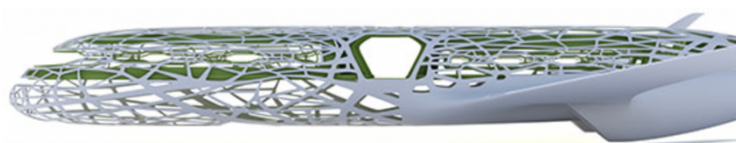


Figura 25 - Conceito futuro da aeronave da *Airbus* impressa, para 2050 (Smithsonian.com, 2012).

⁴ Vide Biomimética em Capítulo 2.

⁵ Retrofit por regra significa modificação de um componente ou sistema (nota do autor)

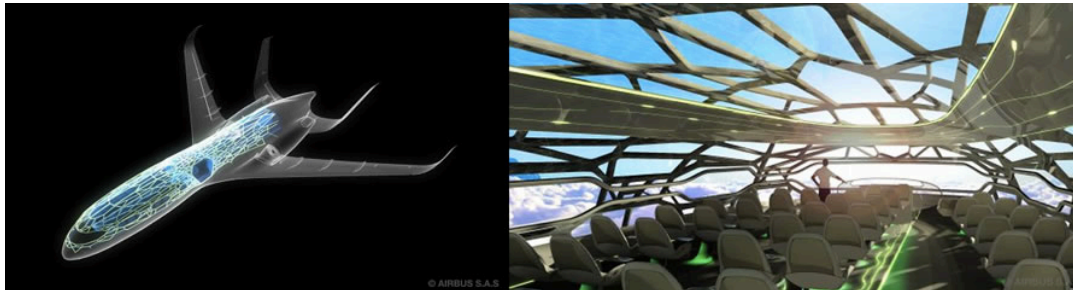


Figura 26 - Conceito futuro da aeronave impressa da Airbus (BionicAircraft, 2017).

O consórcio do *BionicAircraft* inclui participantes de seis países (Alemanha, Espanha, França, Itália, Reino Unido e Suíça), conforme representado na Figura 27, com diferentes tamanhos de empresas, representando todo o ciclo de vida das peças de aeronave (*design*, produção, manutenção, revisão, reparação e *retrofit*), incluindo a integração com o sistema de normalização. O coordenador do projeto é a *LZN Laser Zentrum Nord*.



Figura 27 - Consórcio do projeto *BionicAircraft* (BionicAircraft, 2017).

Apesar de todas as vantagens, um grande desafio da MA é o processo de *design* demorado e caro para peças otimizadas por *design* generativo. Em muitos casos, estes inconvenientes impedem a aplicação da MA, limitando a eficiência energética e de recursos da aeronave.

O relatório da *Wohlert* de 2015, segundo uma publicação do *site sme* (2015) realça que a *Airbus* está também a usar a MA especialmente na produção de peças metálicas complexas através de um consórcio com a *Laser Zentrum Nord (LZN) GmbH*.

Foi redesenhado e fabricado um suporte de cabine, representado na Figura 28, que foi instalado num Airbus A350 XWB em junho de 2014. A LZN usou métodos avançados de otimização da topologia para reduzir material e peso.

O componente biônico foi produzido por SLM (PBF) e era anteriormente uma peça feita de alumínio através de fresagem. Agora é feito de titânio e 30% mais leve. O tempo de desenvolvimento passou de seis meses para menos de um mês (Brandt, 2016).



Figura 28 - Estrutura biônica para integrar o Airbus A350XWB (Airbus, 2016).

Em relação aos materiais, a *Airbus* desenvolveu uma liga de alumínio designada *Scalmalloy*, para processos PBF (explicado posteriormente) para peças metálicas. O material tem propriedades mecânicas melhores do que as ligas de alumínio comercialmente disponíveis, com alta resistência à corrosão e boas propriedades de resistência à fadiga (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

A *Autodesk* e a *Airbus* desenvolveram o maior componente de cabine de avião impresso em 3D: uma estrutura biônica, designada *Bionic Partition*, para separar a cabine de passageiros da *galley*, podendo ser usada para suportar alguns assentos da tripulação.

Vai ser incorporado no A320. O design inovador imita a estrutura celular orgânica e o crescimento ósseo encontrados nos organismos vivos. Este componente e algumas características suas estão na Figura 29. As imagens superiores evidenciam a estrutura e forma como pode ser integrada na cabine, enquanto as inferiores pormenores da otimização.

Foi usado o processo de *design* generativo e DMLS (PBF segundo a classificação da ASTM) no processo de manufatura, com as máquinas M2 da *Concept Laser* (250x250x280 mm³) e EOS M400 (400x400x400 mm³).

Os materiais usados foram titânio e a liga *Scalmalloy*. A estrutura ficou mais resistente e leve. Cerca de 45% (30kg) menos do que seria possível com métodos tradicionais (Airbus, 2016). A integração de uma destas estruturas num A320 leva a uma redução de 10 toneladas de CO₂ por ano (Boric, 2017).

De acordo com a LZN, a união do sistema combustível do Airbus A380, que conecta os tanques de combustível, foi redesenhado numa única peça em titânio através de MA. Devido aos requisitos de segurança, este é um componente composto por catorze partes diferentes, o que leva a uma variedade nos processos de produção que, por sua vez, são demorados, assim como a um elevado custo.

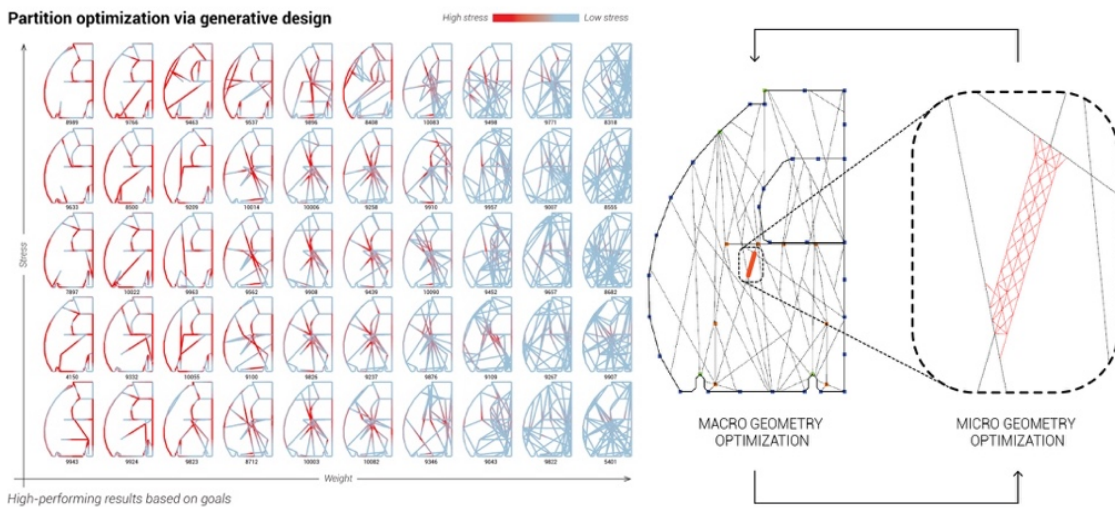
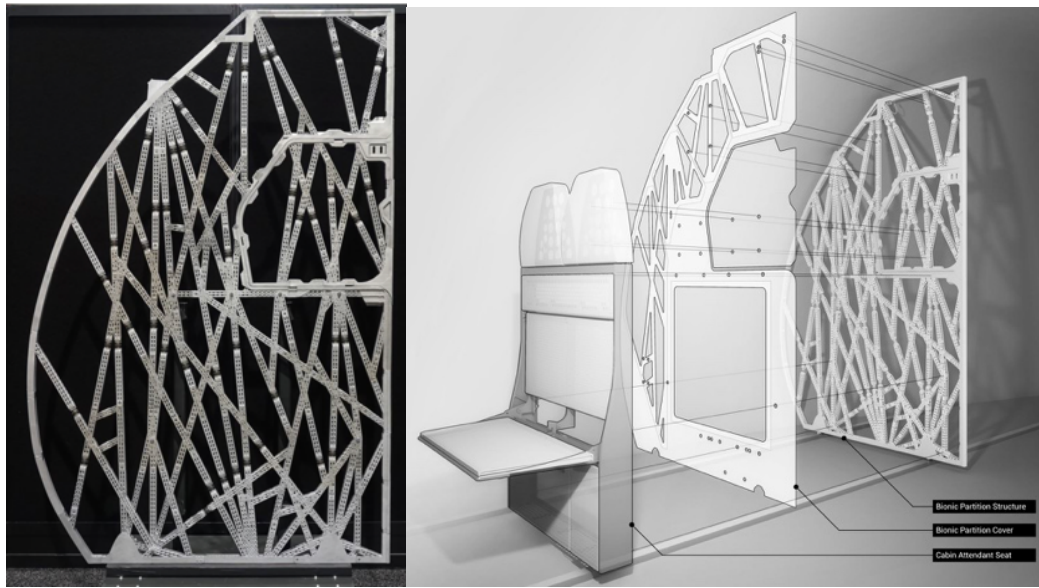


Figura 29 - Bionic Partition da Airbus para o A320 (The Living , 2017).

Assim, as catorze partes transformaram-se numa única, os processos de produção decresceram de trinta e um para cinco e houve uma redução no custo da produção em cerca de metade. A Figura 30 representa o componente anterior e o produzido em MA.

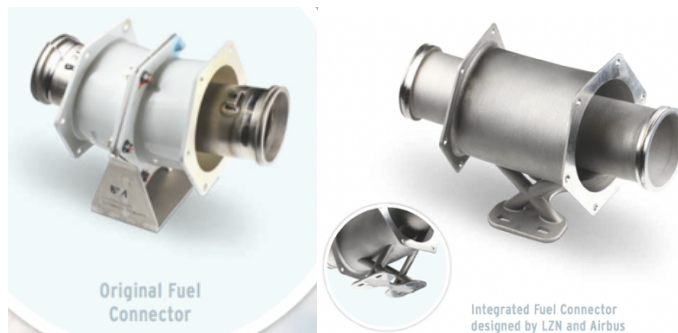


Figura 30 - Design anterior do conetor de combustível (à esquerda) e o otimizado (à direita) (LZN, 2017).

A *Airbus* também trabalhou no projeto e produção de partes plásticas produzidas em MA para as suas aeronaves. O relatório da Wohlers de 2015, conforme informação do site sme (2015), refere que estão a voar entre 45 mil a 60 mil tipos diferentes de suportes de plástico e outros dispositivos para suportar cabos. As peças foram produzidas em Ultem 9085, num processo de FDM (explicado posteriormente) da *Stratasys*.

A *Airbus* também tem a bordo uma entrada de ar impressa no UAV Atlante.

BÉLGICA

A revista *Aviation Maintenance* (2017) refere que empresa belga *Materialise* anunciou no fim de 2015 que estaria a imprimir peças plásticas para o *Airbus A350*. Auxiliada pelas certificações EN9100 e EASA Part 21G, oferece dois materiais plásticos com uma elevada razão resistência vs peso e ignífugos: Ultem 9085 e PA 2241 FR.

IRLANDA

A empresa TEG, de engenharia e produção, na Irlanda, imprime peças quando esta técnica é economicamente favorável face ao uso de métodos tradicionais. Recentemente imprimiu uma grelha do painel do altifalante (revestimento exterior da unidade de áudio da cabine) em plástico, apresentado na Figura 31, para o avião de passageiros *Jetstream 41*. O diretor técnico explicou que esta aeronave já não se produz e que o fabricante do componente original já não se encontra no ativo, pelo que a peça de substituição foi desenhada e produzida usando tecnologia de MA. Demorou nove dias. O diretor geral afirmou que não teria sido economicamente rentável ter usado um método tradicional, como a injeção por molde, já que só eram necessárias vinte unidades. A TEG tem a EASA POA⁶, podendo produzir e emitir peças com o EASA Form1/FAA 8130-3 para uso em aeronaves (Adams, 2017). A TEG é um fornecedor aprovado da *Bombardier*, *Raytheon*, *BAE Systems* e *Airbus*.

PORTUGAL

Segundo o relatório da CE (2014), o Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentável do Produto (CDRSP) no Instituto Politécnico de Leiria, organiza conferências internacionais com foco em MA. Uma série de projetos de investigação foram financiados pela Fundação Portuguesa de Ciência e Tecnologia e pela Agência Portuguesa para a Inovação e a Indústria. Além disso, a

⁶ A certificação POA (Production Organisation Approval) da EASA refere-se à certificação fornecida pela EASA, às empresas, para produção. (nota de autor)

Iniciativa Portuguesa MA (PAMI) foi lançada pelo CDRSP, pela Universidade de Coimbra e pelo CENTIMFE. O PAMI será incorporado como parte do roteiro nacional da infra-estrutura de pesquisa.

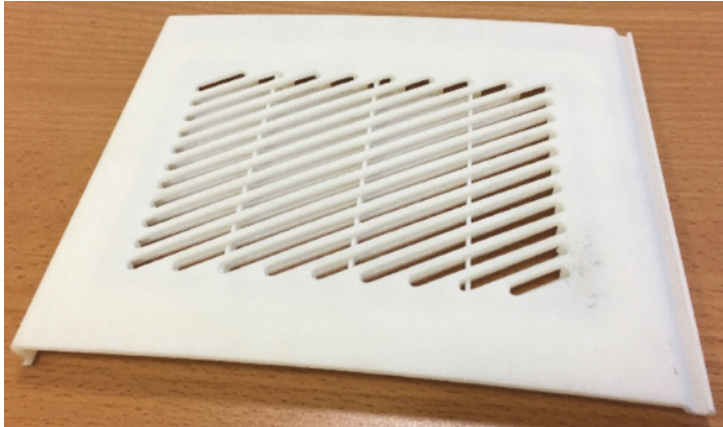


Figura 31 - Grelha de painel altifalante do *Jetstream 41* (Adams, 2017).

3.3.6. Projetos Internacionais

De acordo com um relatório da *AM Platform*, países fora da UE estão a fomentar o seu conhecimento e interesse na MA, com prioridades na investigação em países como os EUA, Austrália e China. Neste momento, de acordo com informação de um relatório da CE (2014), o relatório da *Wohlers* de 2014, afirma que a América do Norte representa a vanguarda na adoção da MA.

Seguidamente apresentam-se exemplos de componentes fabricados em MA por empresas norte americanas do setor.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA

A MA é vista com impacto positivo na economia americana, ao ser possível produzir rapidamente peças complexas em pouco volume (*AM Platform*, 2014).

Em 2012 investiram, como relata o *Advancing Manufacturing - Advancing Europe' - Report of the Task Force on Advanced Manufacturing for Clean Production* (European Commission, 2014), \$2,2 mil milhões em I&D na manufatura avançada. Lançaram uma rede de institutos regionais de inovação, designada *National Network of Manufacturing Institutes* (NNMI), cujo objetivo é eliminar a lacuna existente entre a I&D e a implantação de inovações tecnológicas e facultar fundos para o desenvolvimento da manufatura avançada.

Outro instituto, *National Additive Manufacturing Innovation Institute* (NAMII), investiu mais de \$87 milhões em I&D e tem cerca de 150 parcerias.

Na revista *Aviation Maintenance* (2017), o presidente da MARPA (*Modification and Replacement Parts Association*) afirmou que a ideia de ter um centro de reparação que possa imprimir peças não é absurdo. Disse ainda que os fabricantes devem estender os seus sistemas de qualidade de produção para permitir a produção de peças nas suas próprias instalações de reparação usando a MA. À medida que os sistemas de qualidade de produção forem desenvolvidos para melhorar a prática, isto pode permitir a manufatura *on-demand e on-site* à medida que as peças forem sendo necessárias.

Em relação às forças armadas americanas, o exército americano apresentou no início de 2017 um novo sistema para impressão de drones sob procura, no evento anual de demonstração tecnológica *Army Expeditionary Warrior Experiments* (AEWE). A Figura 32 representa o processo.

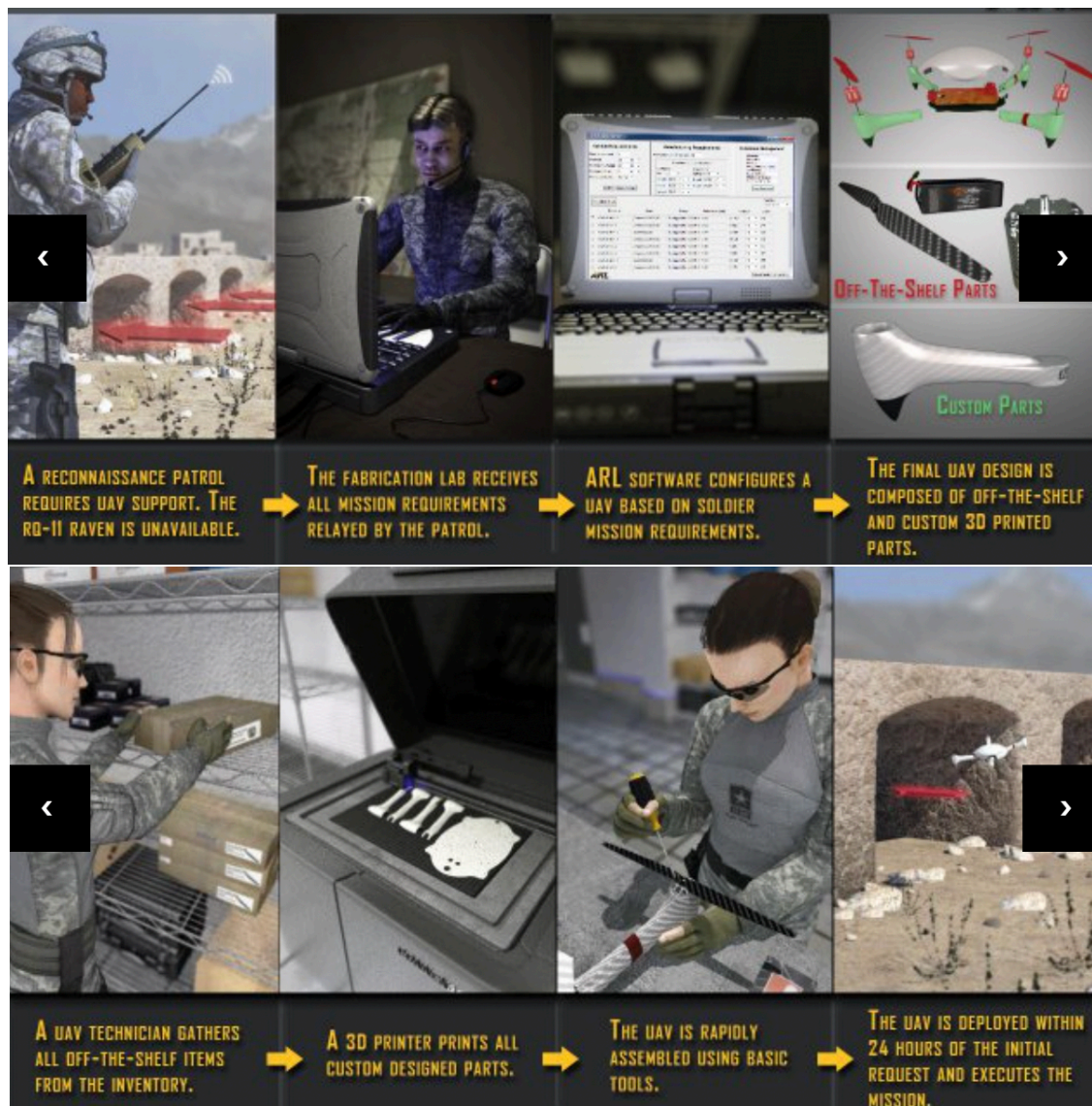


Figura 32 - Conjunto de processos do sistema de impressão de drones sob procura (U.S.Army, 2016).

A mesma revista relata que a Força Aérea Americana tem algumas peças impressas a voar, mas são peças plásticas não estruturais, produzidas em PBF, que não afetam a aeronavegabilidade. Por exemplo, componentes plásticos para os apoios dos braços das cadeiras para a aeronave de comando e controlo *Boeing E-3*. Gibson, Rosen, & Stucker (2015) dão também o exemplo do *Boeing C-40 Clipper* e *Boeing P-8*, como aeronaves que integram plásticos produzidos por PBF.

O foco da impressão 3D é, atualmente, em estruturas terciárias⁷ ou em protótipos de partes estruturais primárias que depois acabam por ser produzidos eventualmente por métodos convencionais.

A reparação aditiva, por outro lado, tem sido usada desde décadas, por exemplo, quando se adiciona material através de soldadura ou plasma spray. Um membro da Força Aérea afirma que o resultado das técnicas aditivas nas propriedades e tolerâncias não é tão bom quanto os da manufatura tradicional, pelo que não são adequadas para a manufatura desde o início da peça. Contudo, refere que as reparações aditivas permitem manter a maioria das propriedades originais e usar o material aditivo para aliviar os pontos de concentração de tensões e restaurar as dimensões. A próxima etapa militar será a impressão de peças da fuselagem que suportam cargas (Adams, 2017).

A marinha americana fez um voo experimental do *MV-22B Osprey* com um componente impresso em titânio, representado na Figura 33 que é usado para ajudar a ligar a nacelle à asa. Há quatro elementos destes por cada nacelle, mas apenas uma delas era impressa em 3D.



Figura 33 - Componente em titânio fabricado com MA (Adams, 2017).

Em 2016, a *Boeing* (2016) tinha cerca de 50 mil peças impressas a voar em aeronaves comerciais, espaciais e militares. O seu portfólio inclui tecnologia em SLS, DMLS, EBM, SL e FDM, abrangendo materiais metálicos e plásticos. Desenvolveu tecnologia para cada aspeto

⁷ Estruturas terciárias são estruturas não relevantes em termos de aeronavegabilidade.

principal destas técnicas, desde ciclos de fabricação até materiais, gestão de processos, geometrias complexas, prototipagem rápida e fabricação final de produção. Os avanços da *Boeing* nesta tecnologia oferecem materiais e processos eficientes.

Em junho de 2017, a *Norsk Titanium* anunciou a primeira entrega à *Boeing* de componentes estruturais produzidos em titânio e aprovados pela FAA para instalação no *Boeing 787*. Foram produzidos através do processo da *Norsk Titanium* designado *Rapid Plasma Deposition*, RPD, (processo DED- explicado posteriormente), que permitiu uma redução *buy-to-fly* de 40:1 para 3:1. Assim, o *Boeing 787* será o primeiro avião comercial a voar com componentes estruturais em titânio manufaturados aditivamente (*Norsk Titanium*, 2017). É apenas conhecido que estes componentes fornecem suporte estrutural para elementos perto da parte traseira da cabine. A *Norsk Titanium* afirma que a localização exata e os *part number* são confidenciais (*Aerospace Manufacturing*, 2017).

No *Boeing 787* há, no total, segundo o projeto SASAM (2015), cerca de 30 peças sinterizadas a laser com processos MA (PBF). Uma delas é o sistema de tubagens de controlo ambiental (ECD) que também já foi aplicado em aeronaves militares, tendo sido instaladas mais de 100 mil no total. Por um processo tradicional, o relatório da *Wohlers*, segundo consta no site *sme* (2015), refere que mais de vinte peças teriam que ser montadas. As peças sinterizadas a laser também pesam menos do que as montagens que substituíram, o que contribui para uma poupança de combustível, como diz um outro relatório da mesma consultora (*Wohlers Associates*, 2011).

Também em 2016 a *Boeing*, com o Laboratório Nacional de *Oak Ridge*, ORNL, produziu a maior peça até então usando MA. É uma ferramenta de corte e furação que usará para construir a asa do próximo avião 777X. A peça mede cerca de 5,30 m de comprimento, 1,70 m de largura e 0,45 m de altura. O engenheiro chefe de materiais e produção da *Boeing* afirmou que as ferramentas fabricadas por MA economizarão energia, tempo, mão-de-obra e custos de produção e fazem parte da estratégia geral da empresa (*Boeing*, 2016).

A *Northrop Grumman Corp.* produziu com sinterização a laser (PBF) uma tubagem, em duas peças. Anteriormente, a peça consistia de nove partes de alumínio que eram soldadas. A Figura 34 representa as duas.

A *General Electrics* adquiriu, em 2012, as empresas *Morris Technologies* e *Rapid Quality Manufacturing* e, em 2016, a *ARCAM AB* e 75% da *Concept Laser*, sendo as quatro especializadas em MA. A *GE* adquiriu-as para expandir a sua capacidade de engenharia e fabricação. A empresa está também a construir um Centro de Desenvolvimento em *Cincinnati* e em 2016, investiu \$32 milhões num centro de I&D em *Pittsburgh*, designado *Center for Additive Manufacturing Advancement*.

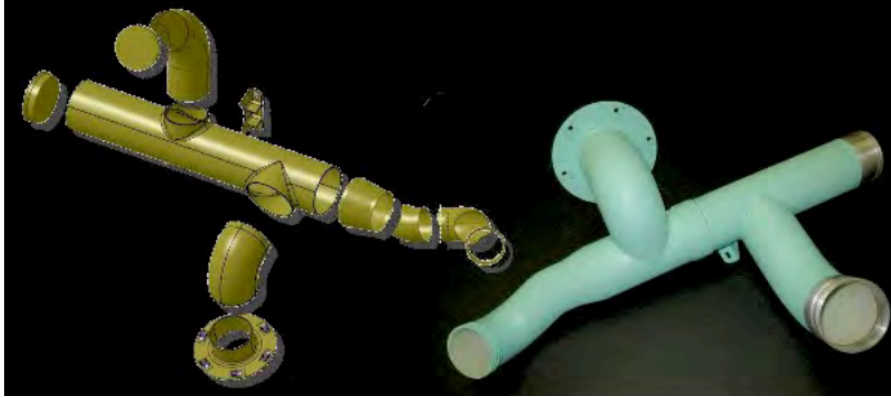


Figura 34 - ECD fabricado com MA (direita) e o anterior (esquerda) (Wohlers Associates, 2011).

A *Morris Technologies* produziu um protótipo de um estator para um motor de turbina a gás de um helicóptero através de DMLS (PBF), com a superliga de níquel IN718 representado na Figura 35.



Figura 35 - Estator em titânio (Powder Metallurgy Review, 2011).

A *GE Aviation* em dezembro de 2015 começou a produzir *fuel nozzles* para o motor *CFMLEAP* numa liga de cobalto-crômio em PBF, que durarão cinco vezes mais do que os obtidos tradicionalmente, serão 25% mais leves e reduzirão o consumo de combustível em 15%, refere a *Ernst & Young* (2016). Segundo informação do site *sme* (2015), o relatório *Wohlers* refere que serão produzidos mais de 40 mil por ano com tecnologia MA.

Também na liga de cobalto-crômio foi produzido com PBF o primeiro componente certificado pela FAA e EASA a integrar um motor da GE, em Fevereiro de 2015: um encaixe do sensor de temperatura de entrada do compressor designado T25, cfr Figura 36. A *GE Aviation* terá trabalhado com a *Boeing* para modernizar mais de 400 motores a jato GE90-94B, que alimentam o *Boeing 777*, com a peça impressa em 3D. Este encaixe protege a eletrônica do sensor de temperatura da formação de gelo e fluxos de ar indesejados dentro do motor (GE Reports, 2015).

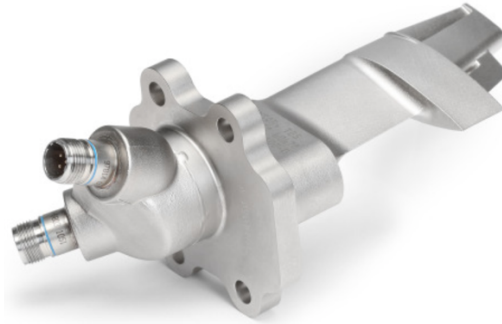


Figura 36 - Encaixe produzido com MA do sensor T25 (GE Reports, 2015).

A GE também está a desenvolver *fuel nozzles* e outras peças produzidas com MA para o motor GE9X, para o novo avião 777X da *Boeing*.

A GE conjuntamente com a empresa *Sigma Labs* desenvolveram uma tecnologia de inspeção para uso nas máquinas da EOS enquanto as peças metálicas estão a ser produzidas. O objetivo é assegurar que a peça está em conformidade com o desenho CAD (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Mais recentemente, a GE anunciou que estará a desenvolver um turbopropulsor avançado, conhecido por ATP, que terá 35% dos seus componentes manufacturados aditivamente e integrará a nova geração do *Cessna Denali*. Oitocentas e cinquenta e cinco peças obtidas por métodos tradicionais serão reduzidas a doze peças, contribuindo para a diminuição do peso em 5%. Entre os componentes estão caixas de rolamentos, cárter, permutador de calor e revestimento da câmara de combustão. O primeiro teste de voo está previsto para 2018 e a produção para 2020 (GE Aviation, 2016). Quanto à reparação, a GE desde meados da década de 90 repara pás de compressor e turbina.

A *Pratt & Whitney* (P&W) revelou, na revista *Aviation Maintenance* (2017), que usou a MA durante décadas como prototipagem rápida de plásticos para melhorar a fabricação e velocidade da produção. Ao longo dos últimos 10 anos, transitaram para tecnologias PBF para metais e usaram a MA para acelerar o processo de desenvolvimento de motores. Em curso está a manufatura de componentes para motores P&W usando esta tecnologia.

A empresa *Aurora Flight Sciences* usou métodos de extrusão, como o FDM, para produzir peças híbridas que incluem a estrutura e componentes eletrónicos para um UAV. A eletrónica impressa diretamente na estrutura permitiu deixar espaço livre para carga adicional (Stratasys, 2014).

A *Paramount Industries*, uma divisão da empresa *3D Systems*, produziu peças PBF para um helicóptero, incluindo peças de ventilação e invólucros de componentes elétricos, assim como estruturas para veículos aéreos não tripulados. As peças foram fabricadas com o material ignífugo PA 2210 FR (poliamida 12).

Ainda de salientar que a *ExOne* desenvolveu uma tecnologia de BJ, MA por aglutinação (explicado posteriormente), que possibilita a impressão de modelos e machos para usar em moldação em areia, sendo o tamanho máximo permitido de 1800x1000x700 mm³ (ExOne, 2017). Por outro lado, permite também a prototipagem rápida de componentes como impulsores e pás de turbina com a superliga de níquel Inconel 625.

3.3.7. Projetos Espaciais

Em 2013 a NASA lançou um *CubeSat*, que integrava estruturas poliméricas produzidas em FDM, com eletrônica embutida. No ano seguinte, componentes metálicos foram usados pela primeira vez numa válvula de um dos motores do foguete *Falcon 9*, sendo que a peça foi impressa em 2 dias ao invés de ter demorado meses, com um método tradicional (Orme, et al., 2016).

De acordo com o relatório *Wohlers*, cfr sme (2015), a empresa *Made in Space*, em colaboração com a *NASA Marshall Space Flight Center*, projetou e construiu um sistema de extrusão de material que opera a baixa/zero gravidade. Esta impressora 3D foi lançada em setembro de 2014 e instalada na Estação Espacial Internacional (ISS), permitindo a reparação e produção sob procura, bem como pesquisas essenciais para manufatura em missões a longo prazo. O objetivo da NASA é aumentar o TRL da impressão no espaço para o nível 6.

A mesma parceria anterior, à qual se juntou a *Northrop Grumman*, anunciou o desenvolvimento de uma plataforma tecnológica que permite o fabrico autónomo e a montagem de sistemas espaciais em órbita, designado *Archinaut*. Será feito um lançamento para demonstração em 2018 (*Made in Space*, 2017).

Por outro lado, a Agência Espacial Europeia - ESA- e a *China Aerospace Science and Technology Corporation* lançaram iniciativas de I&D para desenvolver tecnologia de MA capaz de imprimir no espaço partes metálicas. Segundo um relatório do DMRC (2015), a ESA em colaboração com o DMRC, começou em finais de 2013, a estudar o uso de MA em partes metálicas estruturais, principalmente usadas em satélites de comunicações.

Já para explorar o solo de Marte, a NASA usou o processo FDM para produzir cerca de setenta peças que integraram um veículo motorizado. Um desses componentes era o pára-choques dianteiro (Stratasys, 2017).

Outros exemplos de aplicação espacial são um suporte de liga de alumínio para o satélite de telecomunicações *Atlantic Bird 7*, produzido com MA pela *Airbus Defense and Space* ou a *Aerojet Rocketdyne* que pretende usar a MA para componentes de um foguete (Srivatsan & Sudarshan, 2016).

3.4. Tecnologias MA

A norma F2792 da ASTM estabelece normas globais para a terminologia da MA, tendo caracterizado as tecnologias de MA em sete áreas: *Vat Photopolymerisation*, *Material Jetting*, *Binder Jetting*, *Material Extrusion*, *Powder Bed Fusion*, *Sheet Lamination* e *Directed Energy Deposition*.

Muthu & Savalani (2016) apresentam outra classificação, conforme apresentado no esquema da Figura 37, baseada no estado da matéria-prima.

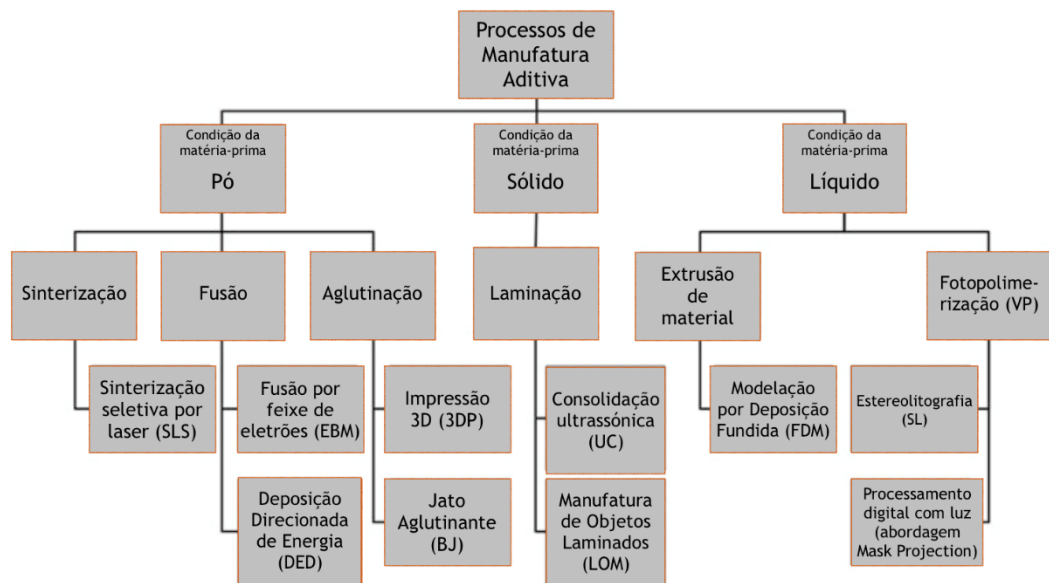


Figura 37 - Classificação dos processos de MA de acordo com a condição da matéria-prima.

Adaptado de Muthu & Savalani (2016).

Seguindo a categorização da ASTM, acima referida, os vários processos MA, correntemente em uso para efeitos de produção, serão apresentados a seguir.

3.4.1. MA por fotopolimerização - Vat Photopolymerization (VP)

Segundo Gibson, Rosen, & Stucker (2015) é um processo que utiliza um fotopolímero⁸ líquido que está contido num tanque e que é processado por fornecimento seletivo de energia de modo a ser objeto de cura em regiões específicas de uma secção do componente a produzir.

Os processos de fotopolimerização utilizam como materiais primários resinas líquidas e, na maioria dos casos, é usada radiação na faixa ultravioleta (UV). Quando a radiação UV incide sob a resina, um fotoiniciador reativo reage com uma molécula de monómero para iniciar uma

⁸ Fotopolímero é um polímero cujas propriedades modificam por ação da luz.

cadeia polimérica. Reações subsequentes ocorrem para construir cadeias poliméricas e, em seguida, para a criação de ligações fortes entre cadeias de polímero, tornando-se sólidos.

Vários tipos de radiação podem ser usados para fazer a cura de fotopolímeros, incluindo raios gama, raios X, feixes de elétrons, UV e, em alguns casos, luz visível. Nos sistemas comerciais VP a radiação UV e visível é que são as comumente utilizadas.

Gibson, Rosen, & Stucker (2015) identificam 3 abordagens de fotopolimerização: *vector scan*, *mask projection* e *two-photon*.

A primeira, *vector scan*, é o conceito mais aproximado das máquinas comerciais de estereolitografia, do inglês *stereolithography* (SL). O termo fotopolimerização engloba o processo SL e os relacionados, que surgiram posteriormente a esse.

Um esquema de uma máquina encontra-se ilustrado na Figura 38, que mostra os subsistemas principais, incluindo o laser e o sistema ótico, a plataforma e o elevador, o subsistema de manutenção de resina e o recobrimento. A peça a produzir “nasce” numa plataforma que é mergulhada no tanque de resina. Depois de cada camada ser criada, a plataforma é baixada, a superfície do tanque é recoberta, e o laser começa a criar a próxima camada tendo por base o modelo CAD do componente, construindo a peça de baixo para cima.

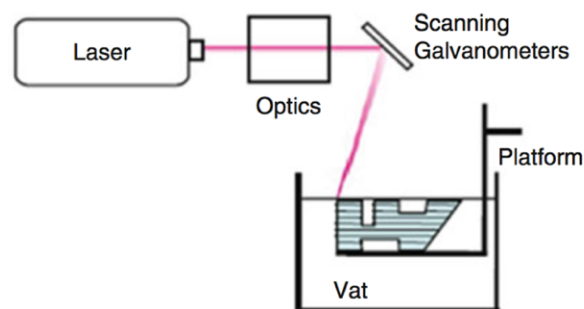


Figura 38 - Abordagem *Vector Scan* (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

O processo *Mask Projection*, cfr Figura 39, começa com o modelo CAD da peça, que é então “cortado” em várias alturas. Cada seção transversal resultante é armazenada como *bitmaps* para ser exibida na “máscara” dinâmica (Digital micro-mirror Device - DMD). A radiação UV reflete no DMD e é visualizada na superfície da resina para curar camada a camada.

A principal vantagem dos métodos de *mask projection* é a velocidade: uma vez que uma seção transversal pode ser curada de uma só vez, pode ser mais rápido do que o varrimento de um raio laser.

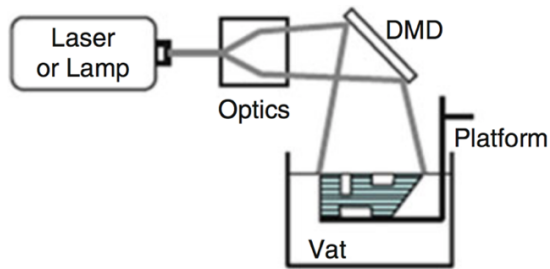


Figura 39 - Abordagem *Mask Projection* (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

No processo de fotopolimerização por dois fótons, na Figura 40, o fotoiniciador requer dois fótons para atingi-lo antes de se decompor para formar um radical livre que possa iniciar a polimerização. A abordagem por dois fótons, que tem a maior resolução, permanece apenas alvo de pesquisa.

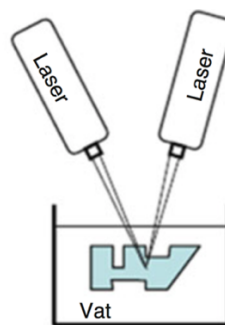


Figura 40 - Abordagem *Two-Photon* (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Relativamente aos materiais, as resinas epóxi produzem peças mais precisas, mais duras e mais resistentes do que as resinas de acrilato. Enquanto a polimerização de composições de acrilato leva a uma contração de 5-20%, a polimerização de composições de epóxi apenas leva a uma contração de 1-2%. Este baixo nível de encolhimento associado à química do epóxi contribui para uma excelente adesão e tendência reduzida dos substratos flexíveis para encurvar durante a cura. No entanto, as resinas epóxi têm a desvantagem da fragilidade das peças curadas.

A adição de acrilato a algumas resinas epóxi é necessária para a peça ganhar resistência, de modo a ter a integridade suficiente para ser manipulada sem distorção durante a manufatura. Os acrilatos também são úteis para reduzir a fragilidade das peças de epóxi. Outra desvantagem das resinas epóxi é a sua sensibilidade à humidade, que pode inibir a polimerização.

Como resultado, a maioria das resinas para SL comercialmente disponíveis atualmente são epóxidos com algum conteúdo de acrilato. É necessário ter ambos os materiais presentes na mesma fórmula para combinar as vantagens. A melhoria na precisão resultante do uso de

resinas híbridas deu ao SL um tremendo impulso na melhoria das propriedades das peças produzidas.

Duas das principais vantagens da tecnologia VP em relação a outras tecnologias MA são a precisão e o acabamento superficial. Outra vantagem é a sua flexibilidade, suportando muitas configurações diferentes de máquinas e escalas de tamanho das mesmas.

Uma desvantagem dos processos de VP é o uso de fotopolímeros, uma vez que as substâncias químicas são limitadas a acrilatos e epóxis para materiais comerciais, não havendo possibilidade de processamento com outro tipo de matéria-prima.

Geralmente, os materiais atuais para SL não têm a durabilidade de termoplásticos moldados por injeção de boa qualidade. Além disso, as suas propriedades mecânicas degradam-se ao longo do tempo, pelo que são requeridas estruturas de suporte e processos de acabamento para as peças se tornarem mais resistentes. Estas limitações impedem que os processos SL sejam usados para muitas aplicações de produção.

3.4.2. MA por projeção de material - Material Jetting (MJ)

De acordo com Gibson, Rosen, & Stucker (2015) consiste na deposição de material através de uma cabeça de impressão a jato de tinta. Este processo, representado na Figura 41, contrasta com o *binder jetting*, exposto no subcapítulo seguinte, onde o aglutinante ou outro aditivo é impresso numa camada em pó que forma a maior parte da peça.

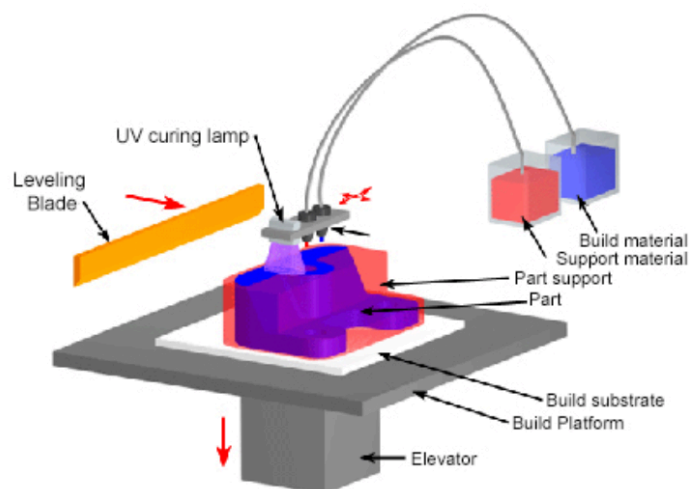


Figura 41 - Esquema representativo do processo Jato de Material (Loughborough University, 2017).

O processo normalmente usa um fotopolímero, mas também pode depositar ceras e outros materiais. Entre os materiais mais estudados e os mais promissores para futuras aplicações estão os polímeros, cerâmicas e metais. O processo de acabamento inclui a remoção do material de suporte.

Nos polímeros, as variáveis de processo, como a velocidade da cabeça de impressão, a velocidade das gotas e a sua frequência afetam o processo de deposição do material que forma cada camada. Estas variáveis de processo variam de acordo com as características do fluido que está a ser usado, de modo que o desenvolvimento de alguns processos ou o seu ajuste são geralmente necessários quando se tenta imprimir um novo material ou desenvolver uma nova tecnologia de impressão (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Os metais que foram impressos incluem cobre, alumínio, várias soldas e mercúrio. Um grande desafio identificado para a deposição de metais é que o ponto de fusão do material é frequentemente alto o suficiente para danificar significativamente os componentes do sistema de impressão.

Entre os desafios técnicos do MJ estão a obtenção do material líquido, a formação de gotas e o controlo da deposição dessas gotas, como a seguir se explica resumidamente.

Para facilitar o jato, os materiais que são sólidos à temperatura ambiente devem ser aquecidos para ficarem liquefeitos. Enquanto fatores como a densidade do líquido ou a tensão superficial e o *design* da cabeça de impressão ou do bocal podem afetar os resultados, a limitação da viscosidade rapidamente se torna o aspeto mais problemático para a formação de gotas no jato de material. Para fluidos de alta viscosidade, esta deve ser reduzida, sendo as práticas mais comuns o uso de calor ou solventes.

Mas as temperaturas de impressão não podem ser demasiado altas, isto porque, quando aquecidos por longos períodos de tempo, os pré-polímeros começam a polimerizar, elevando a viscosidade e possivelmente entupindo o bico de impressão. Por outro lado, a reação de polimerização, que ocorre após a impressão, deve ser cuidadosamente controlada para garantir a precisão dimensional.

Depois de liquefeito, o material deve ser convertido para um número de pequenas gotas. Isto é muitas vezes dependente de uma relação finamente sintonizada entre o material a ser impresso, o *hardware* envolvido e os parâmetros do processo. Pequenas mudanças no material, como a adição de minúsculas partículas, também podem alterar radicalmente o seu comportamento de formação de gotículas, assim como mudanças na configuração física.

A mudança de fase do material para o estado sólido deve ocorrer durante o percurso das gotas ou logo após o impacto. O tempo e o local dessa conversão também afetarão a interação das gotas com o substrato e a deposição final criada.

Entre as tecnologias de formação de gotas conhecem-se os métodos CS (*continuous stream*) e DOD (*drop-on-demand*), representados na Figura 42. Atualmente, todas as máquinas comerciais de impressão AM usam cabeças de impressão DOD.

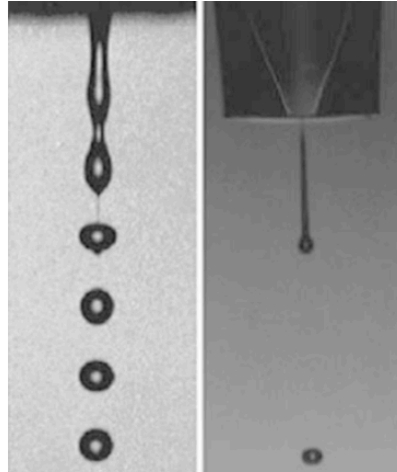


Figura 42 - Deposição CS (esquerda) e DOD (direita) (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

No modo DOD as gotas individuais são produzidas diretamente a partir do bico, através de pulsos de pressão, criados em momentos específicos por atuadores térmicos, eletrostáticos, piezoelétricos, acústicos ou outros, o que faz com que o fluido seja expulso.

As máquinas são relativamente caras face àquelas dos outros processos e os tempos de construção lentos, mas para peças pequenas a precisão é boa, pelo que estas máquinas são frequentemente usadas para fabricar moldes para joalheria e medicina dentária.

A escolha dos materiais até ao momento é limitada, estando comercialmente disponíveis ceras e fotopolímeros. A precisão da peça, particularmente para grandes dimensões, geralmente não é tão boa quanto a de alguns processos, nomeadamente o método VP e a extrusão de material. No entanto, tem vindo a melhorar, tornando este processo viável para a prototipagem e manufatura direta.

3.4.3. MA por jato aglutinante - Binder Jetting (BJ)

De acordo com Gibson, Rosen, & Stucker (2015), neste processo uma fina camada de pó (de polímero, metal ou cerâmica) é projetada na plataforma de construção do componente. Em seguida, a cabeça de impressão pulveriza uma solução, com efeito semelhante ao de uma cola, para fundir o pó apenas nos locais especificados no documento CAD e liga-a à camada previamente impressa.

Uma vez efetuada uma camada, a cama de pó é baixada e o processo repete-se até que a impressão do objeto esteja finalizada e o excesso de pó que suportou o objeto durante a impressão é removido e reciclado. A Figura 43 representa o processo BJ.

Os processos de acabamento envolvem a remoção da cama de pó, a remoção de pó não ligado através de ar pressurizado e a infiltração de outro material para tornar a peça mais resistente e, possivelmente, para transmitir outras propriedades mecânicas, como maior massa específica.

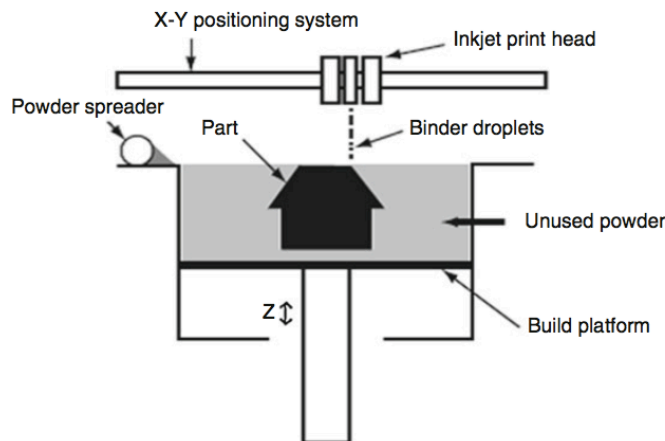


Figura 43 - Esquema do processo *Binder Jetting* (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

No processo BJ apenas uma pequena porção do material da peça é projetado através da cabeça de impressão, sendo o restante material parte da cama de pó, ao contrário do processo MJ.

Este conceito é também diferente do da fusão em camada de pó (Powder bed fusion - PBF) no qual, também, são derretidas partículas de pó para definir uma seção transversal parcial, mas onde é utilizado um laser.

Uma matriz de cabeças de impressão é montada segundo um mecanismo de translação XY. Se a máquina tiver a função de imprimir peças a cor, algumas cabeças de impressão são dedicadas à impressão do material aglutinante, enquanto outras são dedicadas à impressão de cor.

Na área dos metais atualmente é comercializado aço inoxidável recozido e não recozido, bronze e Inconel 625. Para fabricar uma peça de metal, a parte verde (nome dado às peças ligadas por aglutinantes que precisam de processos de acabamento) é removida da máquina de MA e está sujeita a três ciclos de forno.

No primeiro ciclo é utilizada uma temperatura baixa por várias horas para retirar o aglutinante de polímero. No segundo ciclo a temperatura elevada é usada para sinterizar

ligeiramente as partículas de metal, de modo a que a peça tenha resistência. Se esse ciclo for muito longo, as partículas de metal derretem, fazendo com que a peça perca a precisão dimensional e a forma desejada. Após este ciclo, a peça é aproximadamente 60% densa. No ciclo final, um lingote de bronze ou cobre é colocado no forno em contacto com a peça para que se infiltre nos poros da peça, resultando em partes que são 90-95% densas.

O novo material Inconel 625 anunciado em 2014 pela *ExOne*, pode ser sinterizado para uma densidade praticamente completa (a *ExOne* afirma uma densidade superior a 99%), mantendo a precisão dimensional aceitável.

As aplicações para as peças metálicas incluem protótipos e fabricação de baixa quantidade, bem como ferramentas. Se o pó for de polímero e os infiltrantes à base de cera, as peças podem ser usadas como padrões de fundição por cera perdida.

Quanto à fabricação de peças cerâmicas o processo é muito similar em comparação com as peças metálicas. As peças “verdes” criadas por este processo são submetidas a um processo de remoção do aglutinante antes da sinterização da cerâmica, a uma temperatura maior. Por vezes, é usado um metal como infiltrante para formar um composto metalocerâmico.

O processo BJ não necessita de estruturas de suporte já que as peças são autosuportadas pela cama de pó. Por outro lado, é possível aumentar consideravelmente o número de peças que podem ser construídas ao mesmo tempo, já que na mesma camada se podem aglutinar secções de diferentes partes. Também devido ao facto de haver vários bicos de impressão, a velocidade de deposição é alta e a um custo relativamente baixo, pois não é necessária uma fonte de energia de alta potência. A combinação dos materiais em pó com os aglutinantes permite composições materiais que não são possíveis, através dos outros processos.

Como regra geral, no entanto, as peças fabricadas por BJ tendem a ter precisões e acabamentos superficiais mais pobres do que as peças feitas com MJ. As etapas de infiltração da peça que está a ser produzida por outro material são tipicamente necessárias para fabricar peças densas ou para garantir boas propriedades mecânicas. O processo pode ser usado para criar peças relativamente grandes, mas pode ser caro, especialmente para sistemas grandes.

3.4.4. MA por extrusão - Material Extrusion

O conceito de extrusão em MA é executado da seguinte forma, segundo Gibson, Rosen, & Stucker (2015): uma câmara é alimentada com material sob a forma de pó, grânulos ou *pellets*; de seguida, o material é liquefeito e forçado a sair por um bocal quando é aplicada uma pressão. Deve ser extrudido no estado semi-sólido quando sai do bocal e solidificar seguidamente. Além disso, o material acabado de depositar deve “unir-se” ao material que já

foi depositado anteriormente para formar uma estrutura sólida. Assim que uma camada é completa, a máquina move a peça para baixo, de modo a que uma camada adicional possa ser produzida. Podem ser incluídas estruturas de suporte para permitir características geométricas complexas. A Figura 44 representa um esquema elucidativo da extrusão de material.

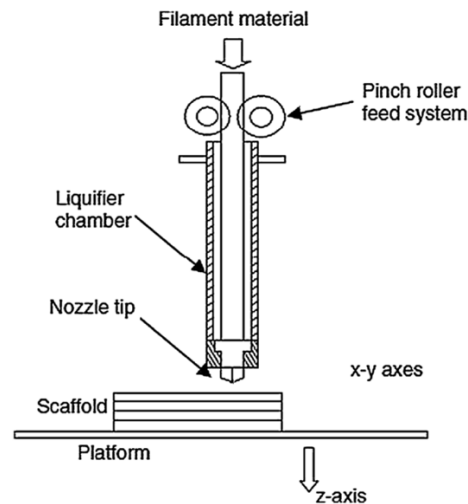


Figura 44 - Esquema de um sistema de extrusão (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Quanto à liquefação do material, quanto maior a câmara, mais dificilmente esta poderá ocorrer, por razões relacionadas com a transferência de calor, correntes térmicas durante a fusão, localização de sensores de temperatura, etc. O material dentro da câmara deve ser mantido no estado líquido, mas a uma temperatura tão baixa quanto possível, uma vez que alguns polímeros se degradam rapidamente a temperaturas mais altas, contaminando o reservatório. Uma temperatura mais alta dentro da câmara requer um arrefecimento adicional após a extrusão.

Se a pressão, que culmina na extrusão do material, permanecer constante, o material extrudido fluirá a uma taxa constante e permanecerá constante com um diâmetro igual ao da secção transversal do bocal. Por outro lado, esse diâmetro também só permanecerá constante, se o percurso através do bocal para a superfície de deposição, for mantido a uma velocidade constante.

O bocal de extrusão determina a forma e o tamanho do filamento extrudido. Um diâmetro maior do bocal permitirá que o material flua mais rapidamente, mas resulta numa parte com menor precisão em comparação com o desenho CAD relativo à peça a criar.

O controlo preciso da extrusão é um compromisso complexo entre um número significativo de parâmetros, destacando-se a pressão de entrada, temperatura, diâmetro do bocal de extrusão e as características do material de deposição.

É atualmente a tecnologia mais popular no mercado. O processo *Fused Deposition Modeling*, FDM, produz peças que estão entre as melhores dos processos de MA recorrendo à construção de peças com polímeros.

O material mais popular é o chamado *ABSplus*, que pode ser usado em todas as máquinas Stratasys FDM atuais. Outro material desenvolvido para atender os padrões industriais é o ULTEM 9085, ignífugo, o que faz dele particularmente adequado para uso em aeronáutica.

Os polímeros de natureza amorfa são preferidos para o processo FDM em relação aos cristalinos, que são mais adequados para os processos PBF.

Entre as desvantagens desta tecnologia por extrusão encontram-se a precisão, necessidade de processos de acabamento e velocidade de construção, que depende da taxa de alimentação e da velocidade de deposição do material.

Houve algumas tentativas de desenvolver tecnologia MA que não usa camadas estratificadas nem planas. Os projetos mais notáveis designam-se *Shape deposition manufacture (SDM)*, *Ballistic particle manufacture (BPM)* e *Curved laminated object manufacture (curved LOM)*. O último, em particular, visa o uso de materiais compósitos reforçados com fibras, intercalados em conjunto para a fabricação de componentes de casca dura, como cones de nariz para aeronaves, com fibra de carbono.

O processo *curved LOM* demonstrou viabilidade, mas também rapidamente se tornou num sistema muito complexo que exigiu equipamentos robotizados e corte a laser de alta potência para os laminados. Uma vez que as peças não podem ser construídas usando uma abordagem de camada plana, o processo de planeamento para geometrias complexas torna-se problemático. No entanto, certas partes que requerem resistência à superfície podem vir a beneficiar desta abordagem não planar.

3.4.5. MA por fusão em camada de pó - Powder Bed Fusion (PBF)

Segundo Gibson, Rosen, & Stucker (2015), os processos PBF provaram ser a abordagem mais flexível da MA. Para a produção de componentes de uso final, os processos PBF superam a aplicabilidade de qualquer outra opção tecnológica. Podem-se produzir peças de alta qualidade de metal e polímeros resistentes.

A fusão em camada de pó é semelhante ao processo BJ, exceto que as camadas de pó são unidas, usando uma fonte de calor, como um laser ou um feixe de elétrons.

Existem quatro mecanismos de união de partículas que estão presentes nos processos PBF. Estes incluem sinterização em estado sólido, ligação induzida quimicamente e sinterização

em fase líquida. A fusão total é o mecanismo mais comumente associado ao processo de PBF de ligas metálicas e polímeros semi-cristalinos. Quando a fusão é total o processo designa-se SLM, *selective laser melting*. Nos outros casos, SLS, *selective laser sintering*.

Conforme mostrado na Figura 45, a sinterização a laser de polímeros utiliza camadas finas de pó (tipicamente de 0,075 a 0,1 mm de espessura) que são espalhadas pela área de construção usando um rolo de nivelamento de pó que gira em contra-rotação.

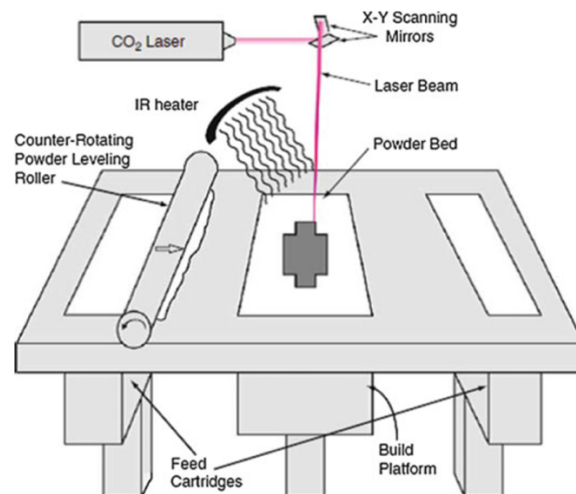


Figura 45 - Esquema do processo sinterização seletiva por laser (SLS) (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

O processo de construção de peça ocorre dentro de uma câmara fechada com dióxido de nitrogênio para minimizar a oxidação e degradação do material em pó. O pó na plataforma de construção é mantido a uma temperatura elevada logo abaixo do ponto de fusão e/ou temperatura de transição vítrea do material em pó.

É colocado acima da plataforma de construção aquecimento através de infravermelhos para manter uma temperatura elevada em torno da peça que está a ser formada, bem como acima dos cartuchos de alimentação para pré-aquecer o pó antes de se espalhar sobre a área de construção. Em alguns casos a plataforma de construção também é aquecida. Este pré-aquecimento do pó e a manutenção de uma temperatura elevada e uniforme dentro da plataforma de construção são necessários para minimizar os requisitos de potência do laser do processo e evitar a deformação da peça durante a construção devido à expansão e contração térmica não uniformes.

Uma vez formada e pré-aquecida uma camada de pó, um feixe de laser de CO₂⁹ é direcionado para a plataforma de construção de modo a fundir o material para formar a secção

⁹ O laser de CO₂ é usado na sinterização de polímeros. Na sinterização de metais usa-se o laser Nd-YAG ou, mais recentemente, de fibra.

transversal de uma camada. O pó circundante permanece solto e serve como suporte para camadas subsequentes, eliminando assim a necessidade dos suportes secundários. Depois de completar uma camada, a plataforma de construção é baixada uma camada de espessura e uma nova camada de pó é colocada e nivelada usando o rolo de contra-rotação. O feixe varre novamente a seção transversal da camada subsequente.

Esse processo repete-se até a peça estar completamente construída. Normalmente, é necessário um período de arrefecimento para permitir que as peças atinjam uniformemente uma temperatura baixa o suficiente de forma a que possam ser manipuladas e expostas à temperatura ambiente e à atmosfera. Se as peças e/ou o revestimento em pó estiverem expostos prematuramente à temperatura ambiente e à atmosfera, os pós podem degradar-se na presença de oxigênio e as peças podem deformar-se devido a uma contração térmica desigual. Finalmente, as peças são removidas da cama de pó, o pó solto é separado das peças e outras operações de acabamento, se necessário, são realizadas.

Para efeitos de PBF, os polímeros termoplásticos são adequados devido às suas temperaturas de fusão relativamente baixas e baixas condutividades térmicas. Já os polímeros termoendurecíveis normalmente não são usados em PBF, uma vez que devido ao aumento de temperatura necessário para a fusão de partículas eles degradam-se, mas não fundem.

Entre os termoplásticos amorfos e cristalinos, mais raros, os amorfos são os menos favoritos já que fundem numa ampla gama de temperaturas e não formam características sólidas bem definidas, sinterizando em formas altamente porosas. Os cristalinos têm um ponto de fusão bem definido, o que resulta em maior massa específica. No entanto, os polímeros cristalinos exibem maior encolhimento em comparação com materiais amorfos e são mais suscetíveis ao encurvamento/enrolamento (*curling*) e distorção e, portanto, exigem um controle de temperatura mais uniforme.

Atualmente, o material mais comum usado no PBF é a poliamida, um polímero termoplástico, comumente conhecido como *nylon*. A maioria das poliamidas tem uma cristalinidade bastante alta e são classificadas como materiais semi-cristalinos.

As propriedades mecânicas das peças produzidas com pós de poliamida aproximam-se das de peças termoplásticas moldadas por injeção, mas com alongamentos significativamente reduzidos.

Os polímeros em PBF podem ter aditivos que melhoram as suas propriedades mecânicas. Por exemplo, o material *Duraform GF* da *3D Systems* é poliamida 12 preenchida com partículas de vidro. O aditivo de vidro aumenta significativamente a rigidez do material, mas também reduz a ductilidade, em comparação com os materiais de poliamida sem aditivo. Do mesmo modo, a empresa EOS GmbH disponibiliza materiais de poliamida preenchidos com partículas de alumínio, fibra de carbono e grânulos de vidro.

Uma característica única dos sistemas da EOS GmbH para polímeros e areia de fundição é o uso de dois raios laser para a construção mais rápida de peças, fazendo da empresa o líder do mercado neste segmento de tecnologia. Mais recentemente, os sistemas de sinterização a laser de polímeros começaram a usar um *design* modular, que inclui etapas como as plataformas de construção serem removíveis ou o processo de reciclagem ser automático.

Em relação aos metais, comparativamente aos polímeros, apresentam maior condutividade térmica, propensão para oxidar, maior tensão superficial e maior refletividade do laser, o que os torna mais difíceis de processar.

A propósito dos metais, toda a região do material submetido a energia térmica é fundida a uma profundidade que excede a espessura da camada. A energia térmica dos varrimentos subsequentes de um laser ou feixe de elétrons é suficiente para voltar a fundir uma porção da estrutura sólida previamente solidificada. Portanto, este tipo de fusão total (SLM) é muito eficaz na criação de estruturas de alta densidade de metais.

No caso da sinterização a laser para os metais, quase todas as máquinas usam lasers de fibra que são mais baratos, mais compactos, têm manutenção mais econômica, maior eficiência energética e o feixe tem melhor qualidade que os lasers Nd:YAG, também usados.

No caso de ser usado o processo EBM, *electron beam melting*, um feixe de elétrons de alta energia é usado para induzir a fusão entre partículas de pó de metal.

Algumas diferenças entre EBM e a sinterização a laser estão representadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Diferenças entre EBM e mLS (metal Laser Sintering) (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Characteristic	Electron beam melting	Metal laser sintering
Thermal source	Electron beam	Laser
Atmosphere	Vacuum	Inert gas
Scanning	Deflection coils	Galvanometers
Energy absorption	Conductivity-limited	Absorptivity-limited
Powder preheating	Use electron beam	Use infrared or resistive heaters
Scan speeds	Very fast, magnetically driven	Limited by galvanometer inertia
Energy costs	Moderate	High
Surface finish	Moderate to poor	Excellent to moderate
Feature resolution	Moderate	Excellent
Materials	Metals (conductors)	Polymers, metals and ceramics
Powder particle size	Medium	Fine

Uma ilustração esquemática do processo EBM está representada na Figura 46.

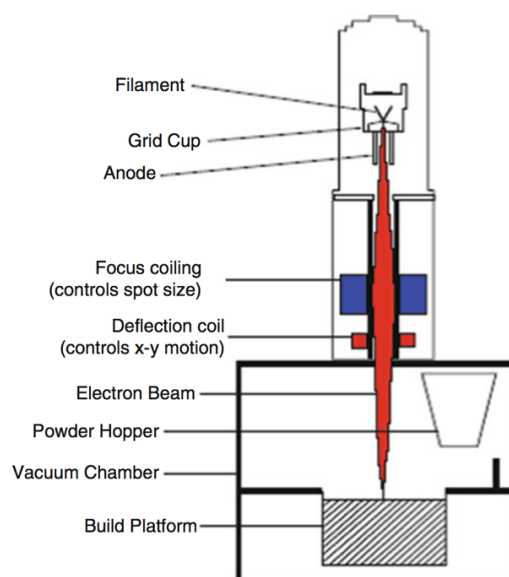


Figura 46 - Esquema do processo EBM (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Ao contrário dos feixes laser, que irradiam o pó quando os fótons são absorvidos pelas partículas de pó, os feixes de elétrons aquecem o pó por transferência de energia cinética dos elétrons incidentes para as partículas de pó.

A geração do feixe de elétrons geralmente é um processo muito mais eficiente do que a geração do raio laser, embora com os mais recentes lasers de fibra esta melhor eficiência não esteja garantida no futuro. Atualmente, também as tensões residuais são muito menores aquando do uso do processo EBM face à sinterização a laser devido à maior temperatura da cama de pó no primeiro caso. Além disto, não são necessários suportes no EBM.

Na MA por processo EBM a camada de pó deve ser condutora. Assim, o EBM só pode ser utilizado para processar materiais condutores (por exemplo, metais) enquanto que os lasers podem ser utilizados com qualquer material que absorva energia no comprimento de onda do laser (por exemplo, metais, polímeros e cerâmica).

Para os processos de PBF de metal, as ligas utilizadas (Ti, aço inoxidável, CoCr, etc.) são, por norma, totalmente fundidas. A rápida fusão e solidificação destas ligas metálicas resulta em propriedades únicas que são distintas e podem ser mais desejáveis do que as peças moldadas ou feitas de ligas idênticas.

Geralmente, qualquer metal que possa ser soldado é considerado um bom candidato para o processo PBF. Vários tipos de aços, tipicamente inoxidáveis e aços usados na produção de ferramentas, titânio e suas ligas, ligas de níquel, algumas ligas de alumínio e cobalto-crômio foram processados e estão comercialmente disponíveis.

Deve notar-se que as ligas que quebram sob altas taxas de solidificação não são boas candidatas ao processo PBF. À medida que os processos de sinterização a laser para metais e EBM avançam, os tipos de ligas metálicas que são comumente utilizadas crescerão e novas ligas especificamente adaptadas para a produção de PBF serão desenvolvidas.

Vários materiais cerâmicos estão disponíveis comercialmente incluindo óxido de alumínio e óxido de titânio. A empresa *3D Systems* disponibiliza *cermets*, que são compostos metalocerâmicos.

No processo PBF os parâmetros do processo podem ser agrupados em quatro categorias: (1) parâmetros relacionados com o laser (potência do laser, diâmetro do feixe incidente, duração e frequência de feixe pulsado, etc.), (2) parâmetros relacionados com o varrimento do feixe (velocidade e padrão), (3) parâmetros relacionados com o material de deposição (propriedades, forma, tamanho e distribuição das partículas, densidade e espessura da camada de pó) e (4) parâmetros relacionados à temperatura (valor e uniformidade). A maioria destes parâmetros são fortemente interdependentes e interagem mutuamente.

A precisão e o acabamento da superfície são fortemente influenciados pelas condições de operação e pelo tamanho das partículas de pó. Os tamanhos de partículas mais finas produzem partes mais suaves e precisas, mas são difíceis de espalhar e manipular. Os tamanhos de partículas maiores facilitam o processamento de pó, mas prejudicam o acabamento superficial e a espessura mínima da camada. Os materiais de construção utilizados nestes processos tipicamente exibem 3-4% de contração, o que pode levar à distorção da peça.

Durante a construção da peça o pó solto é um material de suporte suficiente para PBF de polímero. Isso economiza tempo significativo durante a construção e processos de acabamento e permite geometrias complexas. Os suportes, no entanto, são necessários para a maioria dos processos PBF metálicos. As altas tensões residuais experimentadas ao processar metais significam que as estruturas de suporte normalmente são necessárias para evitar que a peça seja deformada. Isso significa que o processo de acabamento de peças metálicas após a MA pode ser caro e demorado.

Com os processos PBF, o tempo total de construção pode demorar mais do que outros processos de MA devido aos ciclos de pré-aquecimento e arrefecimento envolvidos. No entanto, como é o caso de vários projetos de máquinas mais recentes, as plataformas de construção removíveis permitem que o pré-aquecimento e o arrefecimento ocorram fora da linha, permitindo assim uma maior produtividade da máquina. Além disso, há a capacidade de produzir peças numa única construção.

O PBF pode processar uma grande variedade de materiais, em contraste com muitos outros processos de MA. Embora seja mais fácil controlar o processamento de polímeros semicristalinos, o processamento PBF de polímeros amorfos tem sido bem sucedido. Muitos

metais podem ser processados. Alguns materiais cerâmicos estão disponíveis comercialmente, mas alguns outros foram apenas demonstrados na pesquisa.

A sinterização a laser baseada em polímeros é geralmente usada para protótipos e aplicações de uso final em muitas indústrias, competindo com moldação por injeção e outros processos de fabricação de polímeros. Os processos PBF são particularmente competitivos para peças de baixo a médio volume e geometricamente complexas.

Os processos de PBF de metal estão a tornar-se cada vez mais comuns para aplicações aeroespaciais e biomédicas, devido aos seus benefícios de complexidade geométrica e às suas excelentes propriedades de materiais quando comparadas com as técnicas tradicionais de fabricação de metais.

De forma a melhorar a velocidade de construção dos processos PBF, tornando-os mais competitivos em termos de custos, várias organizações estão a desenvolver maneiras de fundir linhas ou camadas de material polimérico ao mesmo tempo. É provável que os processos PBF continuem a ser um dos tipos mais comuns de tecnologias MA.

3.4.6. MA por laminação - Sheet Lamination

Neste processo, segundo Gibson, Rosen, & Stucker (2015) camadas finas de material (tipicamente papel ou metais) são ligadas usando adesivos, fontes de calor de baixa temperatura ou outras formas de energia para produzir um objeto em 3D.

É possível classificar este processo segundo a ordem em que as camadas são unidas e o corte do material laminado. Em alguns processos, o laminado é ligado primeiro ao substrato e é então depois cortado (processos *bond-then-form*). Para outros processos, o laminado é primeiro cortado e depois ligado ao substrato (*form-then-bond*).

Nos processos *bond-then-form*, o processo de construção geralmente consiste em três etapas na seguinte sequência: colocar o laminado, ligá-lo ao substrato e cortá-lo de acordo com o contorno do ficheiro CAD que se pretende criar.

Um rolo aquecido passa através da chapa depois de colocá-la para formar uma camada, derretendo o adesivo e produzindo uma ligação entre as camadas. Um laser (ou, em alguns casos, uma faca de corte mecânico) projetado para cortar até uma profundidade de espessura de uma camada corta o contorno transversal com base na informação do desenho 3D. O material não utilizado é deixado no lugar como material de suporte e é cortado em pequenas peças retangulares denominadas "cubos". Este processo de ligação e corte é repetido até a peça completa ser construída. Após a construção, o bloco é retirado e sofre processos de

acabamento. Os pedaços de material em excesso são separados da peça. É relativamente difícil remover a parte do bloco de peça quando está frio, portanto, muitas vezes é posto num forno por algum tempo.

Os princípios de laminação de chapas *bond-then-form* também foram aplicados com sucesso na fabricação de peças de metal, cerâmica e materiais compósitos.

As vantagens específicas dos processos baseados em adesão como *bond-then-form* incluem: contração, tensões residuais e problemas de distorção menores durante o processo; grandes peças podem ser fabricadas rapidamente; pode ser utilizada uma variedade de materiais de construção, incluindo folhas de papel e polímero e fitas de metal ou cerâmica; matéria-prima não tóxica, estável e fácil de manusear; e baixo custo de material, máquina e processo em relação a outros sistemas de MA.

Nos processos *form-then-bond* o material em chapa é cortado na forma desejada primeiro e depois ligado ao substrato. Esta abordagem é popular para a construção de peças em materiais metálicos ou cerâmicos que são termicamente ligados.

Neste processo um material laminado com um suporte adesivo é colocado num suporte e é cortado no contorno da seção transversal desejada. As linhas de separação e os contornos das estruturas de suporte também são cortados. O laminado com a forma desejada é então colocado sobre as camadas previamente depositadas e ligado a ela. Este processo continua até a peça estar completa. Um esquema do processo é mostrado na Figura 47.

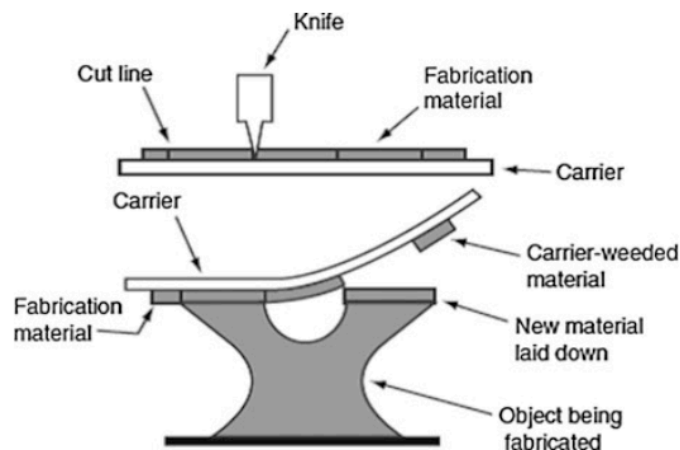


Figura 47 - Esquema de um processo *form-then-bond* (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Esta abordagem facilita a construção de peças com características internas e canais. Outra vantagem é que não existe o risco de corte para as camadas anteriores, ao contrário do *bond-then-form*, onde os processos de corte ocorrem após colocar a camada sobre a camada anterior. Assim, o controle de potência do laser é menos exigente. Além disso, o passo de

eliminação do material de suporte não existe. No entanto, estes processos requerem suporte externo para a construção de características salientes.

Embora amplamente estudadas, as abordagens de laminação com material metálico não tiveram sucesso comercialmente. Isto deve-se principalmente ao facto de que os processos de *bond-then-form* exigem um processo de acabamento extensivo para remover os materiais de suporte, e os processos de *form-then-bond* são difíceis de automatizar para geometrias complexas.

A Consolidação ultrassónica (Ultrasonic Consolidation - UC), representada na Figura 48, é um processo de laminação híbrido, pois combina soldadura de metal ultrassónica e fresagem CNC. É um processo *bond-then-form*.

O objeto é construído numa placa de base rígida, presa a uma placa aquecida, com temperaturas a variar entre a ambiente e aproximadamente 200°C. As peças são construídas de baixo para cima e cada camada é composta por várias folhas de metal colocadas lado a lado e depois cortadas usando fresagem CNC.

Durante este processo, um emissor de ultrassons giratório viaja ao longo de uma fina folha de metal. A folha é mantida em contacto com a placa de base ou a camada anterior através de uma força normal aplicada pelo emissor de ultrassons giratório, como mostrado esquematicamente na Figura 48.

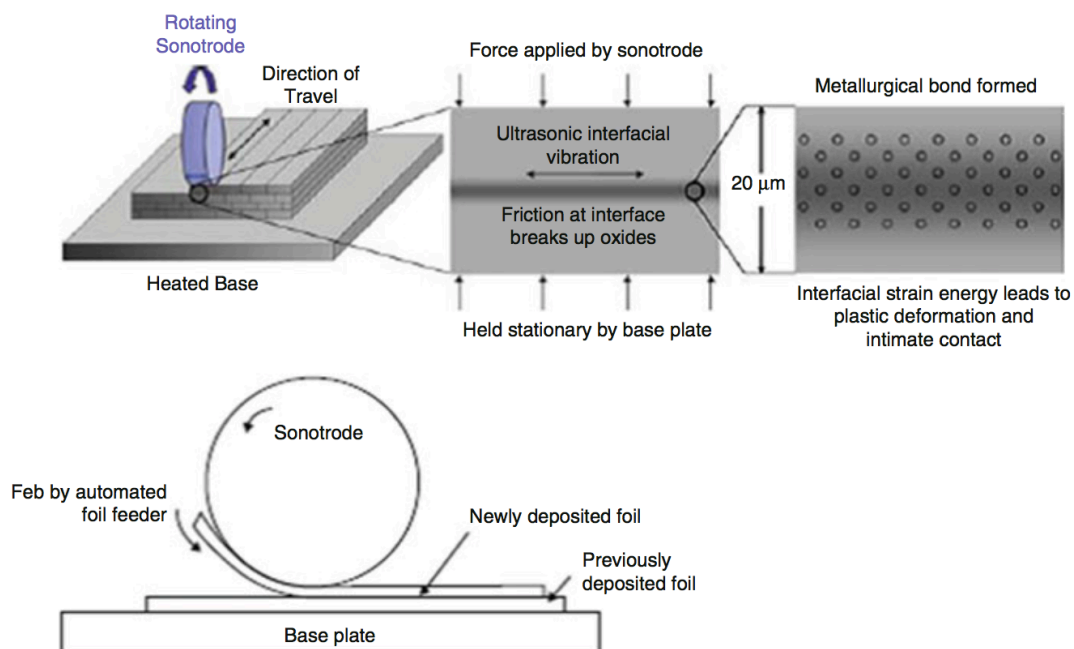


Figura 48 - Esquema da Consolidação Ultrassónica (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

O emissor de ultrassons provoca oscilações transversalmente na direção do movimento, a uma frequência constante. Depois de depositar uma folha, outra folha é depositada adjacente

a ela. Este procedimento é repetido até que uma camada completa seja colocada. A próxima camada está ligada à camada previamente depositada usando o mesmo procedimento. Tipicamente, quatro camadas de folhas de metal depositadas são denominadas por um nível, neste processo. Após a deposição do nível, a cabeça de fresagem do CNC molda o contorno das camadas depositadas. Este processo aditivo-subtrativo continua até a geometria final da peça ser alcançada.

Os materiais usados na consolidação ultrassônica são o alumínio, titânio, latão, aço inoxidável, inconel (ligas de níquel) e cobre.

Os defeitos mais comuns de peças UC são os espaços vazios, quer sejam ao longo das interfaces camada/camada, áreas danificadas também na interface camada/camada, ou entre folhas adjacentes na mesma camada.

As propriedades mecânicas das peças da UC são altamente anisotrópicas devido às propriedades anisotrópicas das folhas de metal e à presença de defeitos em áreas particulares.

A UC oferece, contudo, oportunidades únicas para a fabricação de estruturas com geometrias internas complexas, fabricação de estruturas de materiais múltiplos, incorporação de fibra durante o fabrico e incorporação de componentes eletrônicos e outros recursos para formar estruturas inteligentes.

Uma ampla variedade de materiais tem sido processada incluindo plásticos, metais, cerâmicas e papel. Os materiais cerâmicos são mais frequentemente fabricados usando processos de *bond-then-form*, com fitas de cerâmica.

3.4.7. MA por deposição dirigida de energia - Directed Energy Deposition (DED)

De acordo com Gibson, Rosen, & Stucker (2015) o processo DED usa um laser ou um feixe de elétrons que é projetado para uma região estreita e concreta para aquecer um substrato, derretendo-o e, simultaneamente, fundindo o material que é depositado através de uma cabeça de deposição. À medida que o laser se afasta, o material líquido vai solidificando e, ao mesmo tempo, a passagem do feixe soldou o novo material à camada de baixo. Após a formação de cada camada, a cabeça de deposição afasta-se do substrato por uma espessura de camada.

Ao contrário das técnicas PBF, os processos DED não são usados para derreter um material que é pré-colocado numa cama em pó, mas são usados para derreter materiais à medida que são depositados.

A geometria tridimensional complexa requer material de suporte ou uma cabeça de deposição multiaxial. Uma representação esquemática de um processo DED usando matéria-prima em pó e laser é mostrada na Figura 49.

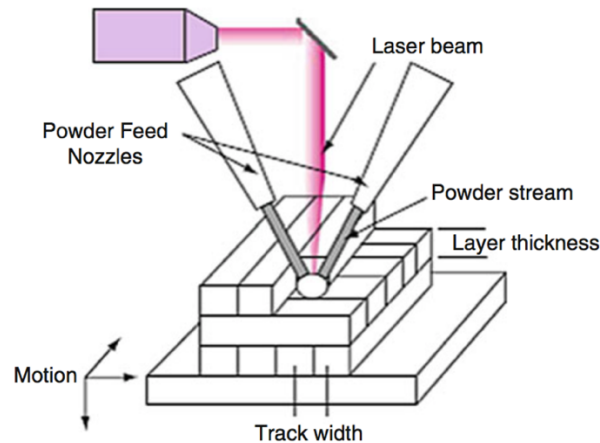


Figura 49 - Esquema de um processo típico DED (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

Embora esta abordagem básica possa funcionar para polímeros, cerâmicas e compósitos de matriz metálica, é predominantemente usada para pós e fio metálicos. Assim, esta tecnologia é muitas vezes referida como tecnologia de "deposição de metal".

A DED é usada para reparar peças existentes e construir peças muito grandes, as quais geralmente requerem um processo de acabamento mais extenso.

Várias organizações desenvolveram máquinas DED designadas *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*, *Directed Light Fabrication (DLF)*, *Direct Metal Deposition (DMD)*, *3D Laser Cladding*, *Laser Generation*, *Laser-Based Metal Deposition (LBMD)*, *Laser Freeform Fabrication (LFF)*, *Laser Direct Casting*, *LaserCast*, *Laser Consolidation*, *LasForm*, entre outros.

Embora a abordagem geral seja a mesma, as diferenças entre estas máquinas geralmente incluem mudanças na potência do laser, tamanho do diâmetro do laser, tipo de laser, método de deposição do pó e do gás inerte e o tipo de controle de movimento utilizado. Em todos estes processos há deposição, fusão e solidificação do material, resultando peças com uma alta densidade.

Os processos DED podem utilizar material em pó ou fio. Cada uma destas opções tem limitações e desvantagens em relação ao outro. Na alimentação por pó, este é mais versátil e a maioria dos materiais metálicos e cerâmicos estão prontamente disponíveis neste estado. Na DED a camada formada é tipicamente depositada numa orientação diferente da anterior, de forma a eliminar o crescimento preferencial de grãos (o que de outra forma torna as propriedades anisotrópicas) e a minimização de tensões residuais.

Na alimentação por fio, o volume que é depositado é sempre o volume do fio que foi inserido. Os fios são mais eficazes para geometrias simples, geometrias sem muitas transições finas/grossas ou para o revestimento de superfícies.

Para a maioria das aplicações de DED, a baixa porosidade do item a produzir é mais importante do que a precisão geométrica. Assim, a seleção de um sistema de alimentação de fio versus sistema de alimentação de pó deve ser feita depois de se determinar que características são preponderantes.

A *AeroMet*, empresa envolvida no desenvolvimento de máquinas DED, criou uma máquina especificamente para a produção de grandes componentes aeroespaciais usando uma pré-liga de pó de titânio e um laser de CO₂ de 18 kW. Embora tenham sido capazes de demonstrar a eficácia da construção destas estruturas de forma económica, esta divisão da empresa não foi sustentável financeiramente e foi encerrada. O uso de um laser de alta potência permite que grandes deposições possam ser feitas com bastante rapidez, mas com uma zona muito mais afetada pela temperatura. As empresas que hoje estão interessadas nas características de alta taxa de deposição da máquina *AeroMet* tipicamente optam por usar fontes de energia de feixe de elétrons com alimentação de fio e, portanto, não há máquinas LBMD comercialmente similares às máquinas do *AeroMet*.

A tecnologia *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF3) foi desenvolvida pela *Lockheed Martin* e melhorada, posteriormente, pela NASA como forma de fabricar e/ou reparar estruturas aeroespaciais tanto terrestres como espaciais. Usando um feixe de elétrons como uma fonte térmica e um alimentador de fio, o EBF3 é capaz de realizar deposição rápida sob fluxos de corrente elevados ou deposições mais precisas usando taxas de deposição mais lentas. As principais considerações que levaram ao desenvolvimento do EBF3 para aplicações baseadas no espaço incluem o facto dos feixes de elétrons funcionarem eficazmente no vácuo. Por outro lado, ao contrário da alimentação por fio, os póis são difíceis de conter com segurança em ambientes com ausência de gravidade. Esta tecnologia permite produção com ligas de alumínio, de titânio, aço de alta resistência e compósitos de matriz metálica (Srivatsan & Sudarshan, 2016).

Também a empresa *Sciaky* desenvolveu uma série de máquinas DED à base de feixe de elétrons que utilizam o fio como material de alimentação. Estas máquinas permitem deposições dentro de uma câmara de construção superior a 6 m, na sua maior dimensão. Essas máquinas são excelentes na construção muito rápida de grandes peças volumosas, permitindo a produção de grandes estruturas (tipicamente para aplicações aeroespaciais), eliminando os longos prazos necessários de entrega para os componentes forjados que substituem.

Um processo de deposição de metal híbrido, designado *Controlled Metal Buildup (CMB)* foi desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer. Respeita uma abordagem de fabricação aditiva e subtrativa integrada.

Os parâmetros importantes do processo incluem o espaçamento do varrimento, a taxa de alimentação do pó, a velocidade, a potência e o tamanho do diâmetro do feixe. Alguns destes parâmetros estão inter-relacionados. Por exemplo, o aumento da potência do feixe ou a taxa de alimentação do pó e a redução da velocidade de marcha aumentam a espessura do depósito. Do ponto de vista da energia, à medida que a velocidade de varrimento aumenta, a energia do feixe que incide diminui devido ao menor tempo de permanência, resultando numa menor superfície onde há material fundido no substrato e um arrefecimento mais rápido.

Relativamente aos materiais, em geral, os metais com altas reflexibilidades e condutividades térmicas são difíceis de processar, como o ouro e algumas ligas de alumínio e cobre. A maioria dos outros metais são bastante simples de processar, a menos que haja uma composição atmosférica inadequada e a ligação seja inibida pela formação de óxido. Geralmente, os materiais metálicos que exibem razoavelmente boa soldabilidade são fáceis de processar. Metais e ligas disponíveis para processos DED que podem ser aplicados na indústria aeroespacial são de titânio, inonel, aço inoxidável e suas ligas, alumínio e algumas ligas de alumínio (Muthu & Savalani, 2016). Os processos DED também são capazes de produzir peças de material compósito.

As cerâmicas são mais difíceis de processar, já que a fissuração ocorre frequentemente durante o arrefecimento devido ao choque térmico. Assim, a maioria das cerâmicas fabricadas através da DED são processadas como parte de um compósito de matriz cerâmica ou metálica.

As principais limitações dos processos DED são a fraca resolução e acabamento superficial. Quando comparados com outros processos MA, os processos DED não podem produzir estruturas tão complexas quanto os processos de PBF. Isto devido ao facto de que as zonas onde há fusão são maiores na DED e resultam numa capacidade reduzida para produzir características de pequena escala, com maior rugosidade da superfície e menor precisão dimensional.

A ductilidade das peças da DED é geralmente considerada como inferior aos equivalentes forjados ou moldados. Em muitas ligas, a ductilidade pode ser recuperada e a anisotropia minimizada por tratamento térmico.

Os processos de acabamento de peças feitas com DED normalmente envolvem a remoção de estruturas de suporte ou o substrato, se este não fizer parte do componente final. Finalizar as operações com maquinaria devido à precisão relativamente baixa da peça e ao acabamento da superfície é comumente necessário. Pode ser necessário um tratamento térmico para aliviar as tensões residuais. Além disso, dependendo do material, o tratamento térmico pode ser necessário para produzir a microestrutura desejada.

A DED pode ser utilizada para reparar e restaurar componentes de alta tecnologia defeituosos e danificados pelo serviço, como pás de turbina e câmaras de combustão. A DED é frequentemente mais bem-sucedida quando usada para agregar valor a outros componentes.

A DED tem sido altamente utilizada por organizações de pesquisa interessadas no desenvolvimento de novas ligas de materiais e na aplicação de materiais novos ou avançados para novas indústrias. Os processos DED são capazes de produzir peças totalmente densas com características microestruturais altamente controláveis. É possível produzir componentes em materiais de gradiente funcional (Functionally Graded Materials (FGM))¹⁰.

Este processo é cada vez mais utilizado para produzir estruturas para aplicações em que a manufatura tradicional resulta numa grande relação *buy-to-fly* e podem ser facilmente integrados na manufatura convencional subtrativa para processos de acabamento (Muthu & Savalani, 2016).

¹⁰ Materiais de gradiente funcional ou FGM são caracterizados pela variação na composição e consequentemente na microestrutura ao longo do seu volume, resultando em diferentes propriedades em função da região do mesmo material. Além disso as suas propriedades globais são diferentes das propriedades dos seus constituintes (Silva, 2017)

Capítulo 4 - Perspetivas de expansão da MA ao setor aeronáutico

4.1. Em termos gerais

4.1.1. Análise de componentes, processos e materiais comuns

Relativamente à Europa, o capítulo anterior deu a conhecer a tendência para a desindustrialização na Europa e a necessidade das empresas investirem mais capital, para obterem mais lucro. Uma indústria de manufatura inovadora e criativa é crítica! A Figura 15 evidencia a inaptidão de Portugal para a implementação da Indústria 4.0 face aos outros países europeus. No entanto, a União Europeia luta para consciencializar os Estados Membros para a necessidade da adoção de novos processos de inovação sustentáveis na indústria, tendo sido a MA identificada como uma KET, tecnologia facilitadora essencial a este processo. No setor aeronáutico, surgiram projetos financiados pela UE como o REPAIR, AEROBEAM ou EMUSIC.

Por outro lado, fatores como a classe média emergente em países em desenvolvimento, a liberalização dos mercados da aviação e o aumento do turismo levam a Associação Internacional de Transporte Aéreo, IATA, a estimar que os passageiros a viajar em 2035 sejam 7,2 mil milhões, face aos 3,8 mil milhões em 2016 (IATA, 2016). Ora, este aumento também se refletirá no aumento do número de aeronaves a voar, sendo evidente a necessidade de reduzir o impacto do crescimento da indústria aeronáutica na população. Sendo as emissões de CO₂ um dos impactos, a ICAO refere que as emissões deste gás provenientes da aviação têm tendência a aumentar cerca de 3-4% por ano e que uma forma de mitigar este risco é aumentando a eficiência do combustível (ICAO, 2017). A Figura 50 mostra o valor do barril de petróleo aquando do lançamento de programas da *Airbus* e da *Boeing*, sendo evidente, nos últimos anos, o aumento do preço. Parece, pois, que a tendência desejada se prende de facto com a melhoria da eficiência do uso de combustível, ora para diminuição das emissões de CO₂, ora para a própria poupança no consumo de combustível usado. A diminuição no peso de componentes fabricados por MA pode ajudar na concretização deste objetivo.

Até à data, milhares de componentes já foram fabricados por MA para a indústria aeroespacial. Feita uma análise do capítulo anterior, conclui-se que uma grande parte do uso da MA é para manufatura rápida/direta, sendo a maioria dos componentes fabricados não estruturais, ou estruturas secundárias e terciárias, à exceção do *turbine nozzle* produzido pela Safran e aprovado pela EASA em junho de 2017, que é uma estrutura primária do funcionamento dos motores de combustão. Há também referências à produção de ferramentas (*rapid tooling*), assim como de casos em que a MA é usada tanto em reparação de

componentes como em prototipagem rápida que foi, aliás o berço da manufatura rápida/direta. As razões pelas quais os componentes aeroespaciais são adequados para a fabricação por MA, assim como os benefícios que esta tecnologia traz para os processos de prototipagem, reparação e produção de ferramenta serão expostos mais à frente.

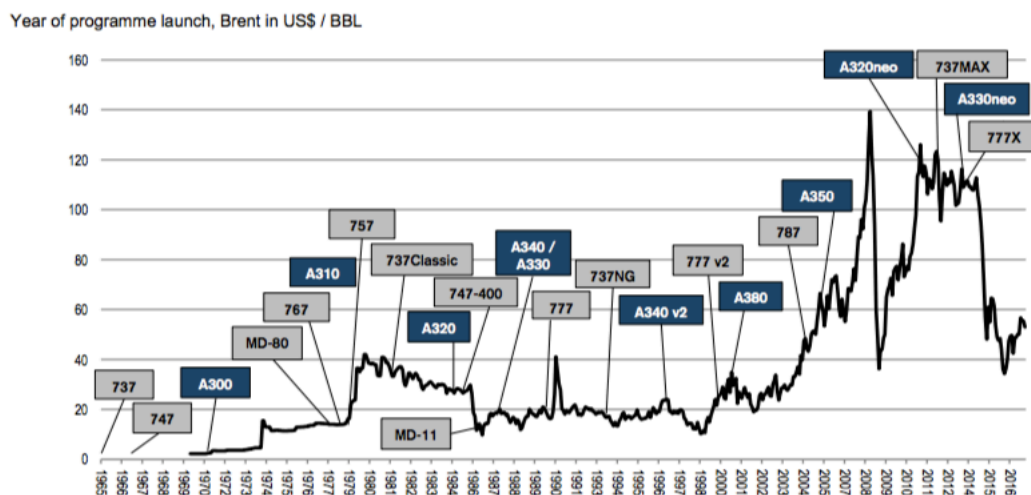


Figura 50 - Ano de lançamento de programas de aviões e correspondentes preços do petróleo (Credit Suisse, 2017).

Também decorrente da análise feita à informação que foi possível obter sobre os materiais e processos utilizados para a produção de componentes por MA, conclui-se que os materiais mais utilizados são polímeros e metais. Entre os polímeros surgem os nomes Ultem 9085 e PA2241FR (ou poliamida 12) que são ambos termoplásticos. Os metais incluem aços, titânio e superligas de níquel, titânio, alumínio e a liga de cobalto-crômio. Relativamente aos processos, os referidos são, de acordo com a classificação da ASTM, PBF e DED para componentes metálicos e FDM (MA por extrusão) e PBF para polímeros. De acordo com a informação obtida, é ainda referido que a Boeing tem também no seu repertório a estereolitografia (VP). No caso das reparações o processo DED é o utilizado, segundo a informação que foi possível obter no capítulo anterior.

As características que os componentes aeroespaciais geralmente possuem que os tornam altamente adequados para fabricação pela MA são:

- (1) **Geometria complexa:** os componentes aeroespaciais geralmente possuem geometrias complexas uma vez que as suas aplicações normalmente requerem componentes com funções integradas. Por exemplo, os componentes estruturais também podem servir como condutas, como uma pá de turbina do motor que também pode ter uma estrutura interna para arrefecimento. Por outro lado, quando usado CNC, por exemplo, o algoritmo de construção de componentes de paredes finas como câmaras de combustão é complexo e demorado. Há inclusive formas otimizadas que não podem ser manufaturadas com os métodos tradicionais. A MA tem a capacidade de manufaturar de

forma simples este tipo de componentes e permite o *design for functionality*, ao invés do *design for manufacturability*. A MA permite também um menor custo para peças complexas, na medida em que, por método tradicional, estas exigiriam a produção de ferramentas como moldes complexos, que é o mais oneroso no processo tradicional;

- (2) **Produção de baixa quantidade:** a MA é mais econômica do que os métodos tradicionais para a produção de baixos volumes, característicos da indústria aeroespacial, pois não é necessária a produção de moldes ou matrizes;
- (3) **Peças difíceis de maquinar e elevada razão *buy-to-fly*:** os componentes aeroespaciais geralmente são produzidos com materiais avançados, tais como ligas de titânio, superligas à base de níquel, aços especiais como os austeníticos ou cerâmicas técnicas, que são de difícil, dispendiosa e de demorada fabricação. Além disso, uma elevada razão *buy-to-fly* associada aos métodos tradicionais resulta num enorme desperdício de material. Por exemplo, componentes aeroespaciais feitos a partir de uma liga de titânio são maquinados a partir de um grande bloco gerando até 90% de resíduos (Srivatsan & Sudarshan, 2016);
- (4) **Peças de alto desempenho:** há componentes aeroespaciais que operam em condições extremas, como temperaturas muito elevadas ou muito baixas ou ambientes químicos extremos. Por exemplo, os componentes do motor estão sujeitos a temperaturas muito altas, surgindo a necessidade de haver soluções de refrigeração e componentes internos feitos de materiais ignífugos. A MA traz oportunidades novas para fabricar peças personalizadas;
- (5) **Leve:** quanto menor o peso da aeronave, menor o gasto de combustível e maior a redução da emissão de gases com efeito de estufa. O menor peso pode ser alcançado através do uso de materiais leves, com elevada razão resistência vs peso. O titânio e o alumínio tradicionalmente foram materiais de escolha por causa disso. Mais recentemente, os compósitos reforçados com fibra de carbono ganharam popularidade. No entanto, também é possível abordar esta questão criando estruturas leves com núcleos internos vazios ou em favo de mel. Este tipo de otimização de topologia é bastante fácil de usar através da MA. De acordo com estimativas da *Airbus Industries*, um avião produzido inteiramente por MA seria 30% mais leve e 60% mais viável do ponto de vista financeiro face aos métodos tradicionais (European Commission, 2015). Estima-se que por cada redução de 100 kg no peso de uma aeronave sejam economizados o equivalente a cerca de 12 - 19 mil milhões de Btus de combustível ao longo da sua vida útil de cerca de 30 anos (U.S. Department of Energy, 2015);
- (6) **Peças sobressalentes:** em média, as aeronaves têm uma vida média de 30 anos, pelo que, durante esse tempo, os fabricantes têm que ter em armazém peças sobressalentes. A MA permite que as empresas possuam modelos digitais das peças prontos a “imprimir”. Numa situação de AOG, rapidamente esta solução torna a aeronave novamente operacional, permitindo à companhia aérea não perder mais dinheiro.

Verifica-se que, de acordo com a informação que foi possível obter em relação aos vários componentes fabricados por MA no capítulo anterior, é possível corroborar pontos acima referidos como é o caso da diminuição no peso, em média, de 34%, o que vai de encontro aos valores da *Airbus*. Também são referidos em alguns casos a diminuição no tempo de entrega, a redução dos resíduos, da razão *buy-to-fly* e do consumo de combustível que é possível obter. Por outro lado, refere-se também a diminuição do número de peças necessárias para fazer uma montagem, o que elimina a necessidade, pelo menos, de uma linha de montagem tão complexa, reduz o inventário e as intervenções de manutenção. Ou seja, há redução no processo de produção e, portanto, redução nos custos que lhe são inerentes.

Em contrapartida, os custos das máquinas de MA representam a maior parte dos custos diretos totais. O custo do material para MA é cerca de 30% do custo total em comparação com um valor quase inconsequente (0,2-2,7%) para métodos tradicionais, como moldagem por injeção. As diferenças a este respeito são devidas em grande parte aos diferenciais de custo que existem no mercado entre matérias-primas para MA e para métodos tradicionais. De acordo com as análises da indústria, os termoplásticos e fotopolímeros para aplicações MA podem custar US \$175-250 por kg, enquanto aqueles usados para moldagem por injeção custam apenas US \$2-3 por kg (Deloitte University Press, 2014). É ainda de referir que a reciclagem ainda não atingiu os valores pretendidos, para além de que varia de processo para processo e conforme a aplicação.

Um outro senão é a necessidade de processos de acabamento referidos várias vezes na descrição dos vários processos MA no capítulo anterior. Felizmente, atualmente já começam a surgir os chamados sistemas de manufatura híbrida, os quais integram um processo de MA e manufatura subtrativa, a fim de realizar o processo de acabamento para dar à peça o aspeto final. A *DMG Mori*, por exemplo, desenvolveu um sistema de manufatura híbrido, designado LASERTEC 65 3D, que compreende o processo LMD (DED) e fresagem. A área de trabalho pode suportar peças com dimensões até 500 mm de diâmetro e 350 mm de altura, um peso máximo de 600 kg e uma espessura de camada de 0,1 a 5 mm. A Figura 51 mostra um exemplo de um cárter de turbina feito de aço inoxidável usando o processo. O tempo de deposição é de 230 minutos e 76 minutos para a fresagem a CNC (Brandt, 2016).

Em relação à produção de ferramentas (*rapid tooling*), o uso da MA é mais benéfico em termos de tempo. Como exemplo, a *Piper Aircraft* manufaturou uma ferramenta em FDM (MA por extrusão) para ser usada, por sua vez, no processo de *hydroforming*¹¹ de componentes estruturais de alumínio para aeronaves. A ferramenta produzida por FDM reduz o tempo de produção de 14 a 4,5 dias, cerca de 68% (Brandt, 2016). Usando métodos tradicionais, a quantidade de tempo necessário para a programação era demasiada, assim como o tempo de

¹¹ Processo de deformação que resulta da aplicação da pressão hidráulica numa chapa metálica sobre um contramolde (nota do autor).

produção e o considerável desperdício de material envolvido que faziam o processo muito oneroso.

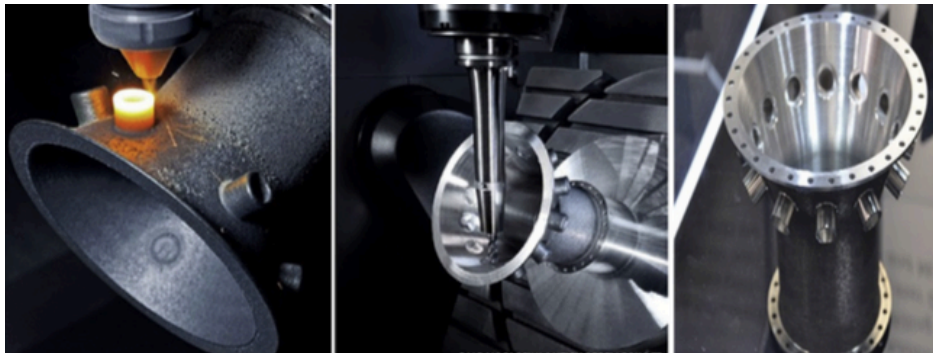


Figura 51 - Processo DED (esquerda), fresagem (centro), peça final (direita) (Brandt, 2016).

Quanto à reparação de componentes e ferramentas, esta é realizada em componentes com elevado desempenho como compressores, turbinas e pás que são feitos de materiais onerosos como é o caso da liga de titânio, Ti-6Al-4V, ou da liga de níquel, Inconel 718, por exemplo, o que os torna dispendiosos. Os componentes aeroespaciais são sujeitos a corrosão, impactos, ciclos térmicos variáveis e cargas, assim como outras condições que podem causar defeitos ou fissuras durante o seu tempo de serviço. Devido ao elevado custo dos materiais, estes componentes são reparados em vez de substituídos.

Um outro exemplo é o da *Optomec* que repara componentes de motor com o processo LENS (DED). O componente que integra o disco do rotor e as pás é extremamente caro, sendo que caso não houvesse reparação, o simples facto de ser danificada uma pá tornaria obsoleto todo o conjunto. A *Optomec* já reparou por exemplo o bordo de ataque do perfil deste componente num motor T700, feito em liga de titânio. Entre as capacidades únicas deste processo na reparação estão: a baixa quantidade de calor usada, o que evita distorções além dos limites dimensionais e minimiza a degradação das propriedades mecânicas do perfil. As propriedades mecânicas do processo LENS Ti-6Al-4V são equivalentes às do material forjado (Brandt, 2016).

Convencionalmente, a soldadura é o processo usado na reparação, mas não se consegue controlar a profundidade a que o material é depositado. Como referido anteriormente, o processo de MA normalmente usado na reparação de componentes metálicos é o DED, no qual um feixe de laser cria uma ligação metalúrgica entre a área de superfície danificada de uma peça e o material que vai ser adicionado para a reparação. Em comparação com as técnicas convencionais de reparação, o uso da MA afeta apenas uma pequena zona circundante de substrato com calor, o que causa uma distorção mínima. Os processos híbridos também podem

ser usados na reparação sendo que permitem uma melhor precisão e acabamento da superfície porque os benefícios de ambos os processos estão incluídos.

No que toca à prototipagem, segue um exemplo que permite confirmar também a vantagem de a MA diminuir o tempo de construção, tal como o custo. Na Índia, o *Gas Turbine Research Establishment* usou o processo FDM para fazer o protótipo de um motor a jato, que compreende a montagem de cerca de 2500 componentes. Anteriormente, este centro de pesquisa teria levado no mínimo um ano e despendido cerca de US \$60.000 para a construção do protótipo físico com uso de maquinação CNC. Com a MA, o tempo foi reduzido para seis semanas e o custo para um terço (Brandt, 2016).

Estas quatro aplicações da MA que incluem prototipagem rápida, *rapid tooling*, reparação rápida e manufatura direta/rápida parecem, pois, estar a desenvolver-se.

Mas a preferência pela MA também pode ser vista por outro ponto de vista. O gráfico da Figura 52 evidencia a diferença nos lucros obtidos entre os fabricantes de aeronaves (são apenas consideradas a *Boeing* e a *Airbus*) e os fornecedores. A MA foi identificada como um dos fatores para diminuir esta diferença, a favor dos fabricantes (Credit Suisse, 2017).

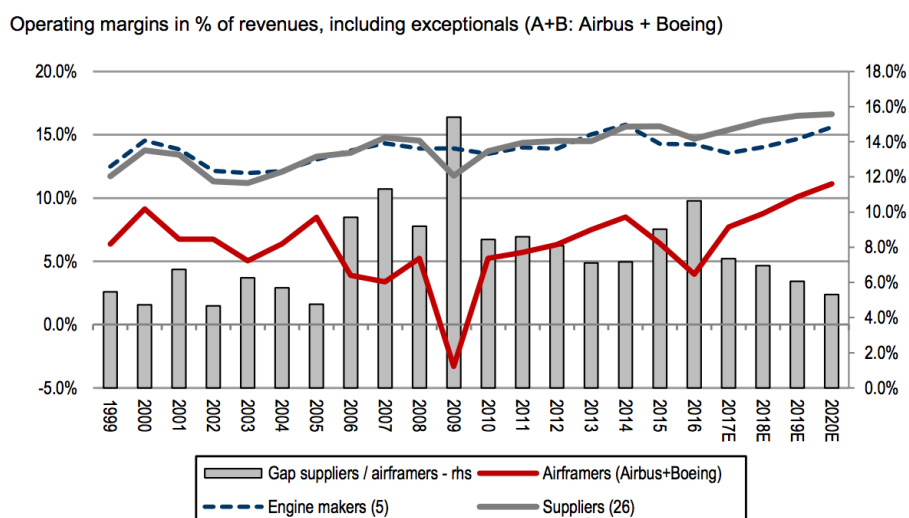


Figura 52 - Margens de lucro entre fabricantes de aeronaves e fornecedores (Credit Suisse, 2017).

A MA pode levar a uma desintermediação parcial entre os fornecedores e os fabricantes, na medida em que estes últimos podem procurar novas maneiras de diferenciar os seus programas, já que a disponibilidade da mesma tecnologia para todos os fabricantes em todo o mundo coloca as posições competitivas de fabricantes como a *Airbus* e a *Boeing* em risco e reduz a sua diferenciação face aos concorrentes. A Tabela 2 mostra que para dois fabricantes diferentes é usada a mesma variante do motor.

Tabela 2 - Novos programas de motor que não são mais uma tecnologia diferenciadora (Credit Suisse, 2017).

	Engine	Original platform	Airframer	Derivative engine	Additional platform	Airframer
CFMI	LEAP-1A	A320neo	Airbus	LEAP-1C	C919	COMAC
Pratt&Whitney	PW1100G	A320neo	Airbus	PW1400G	MS21	Irkut
Pratt&Whitney	PW1500G	CSeries	Bombardier	PW1900G	E195-E2	Embraer
Pratt&Whitney	PW1200G	MRJ	Mitsubishi	PW1700G	E175-E2	Embraer

O estudo do banco *Credit Suisse* (2017) também vê esta tecnologia como uma nova vantagem para os fabricantes na captura de alguns dos lucros de mercado: tomando uma porção para si e reduzindo o peso sobre as companhias aéreas, que têm cada vez mais dificuldade para resistir.

A Tabela 3 mostra uma tendência dos fabricantes para não recorrerem tanto aos fornecedores quando das *major modifications* ou incorporação de novos sistemas. Esta pressão na cadeia de abastecimento fica a dever-se a uma redução de custos, deterioração nas políticas de contratação, algumas mudanças evitando as fontes tradicionais, uma redução nos níveis de *outsourcing*¹² a favor de um *dual-sourcing*¹³ sempre que possível. Os modelos de negócios *aftermarket*¹⁴ em particular provavelmente enfrentarão alguma pressão com os novos programas. Isso terá peso nos lucros da cadeia de abastecimento a médio prazo (6-10 anos).

Tabela 3 - Proveniência da cadeia de abastecimento de *major modifications* ou incorporação de novos sistemas (Credit Suisse, 2017).

Figure 5: New platforms launched: major modifications / new systems mostly coming from supply chain

Launch	Platform	Airframer	Airframe	Wing	Cabin	Avionics & systems	Engine
2005	A350	Airbus	✓	✓	✓	✓	✓
2007	CSeries	Bombardier	✓	✓	✓	✓	✓
2008	C919	COMAC	✓	✓	✓	✓	✓
2008	MS-21	Irkut	✓	✓	✓	✓	✓
2008	MRJ	Mitsubishi	✓	✓	✓	✓	✓
2010	A320neo	Airbus			✓		✓
2011	737MAX	Boeing			✓		✓
2013	777X	Boeing		✓	✓	✓	✓
2013	E-Jet E2	Embraer		✓	✓	✓	✓
2014	A330neo	Airbus		✓	✓		✓

A Tabela 4 identifica as consequências para as empresas, por segmento, com o surgimento da MA. Relativamente às aero estruturas: as empresas que operam neste segmento precisarão investir em tecnologias como a MA para evitar a pressão, implicando investimentos significativos. As empresas do equipamento de cabine e assentos também enfrentarão alguns riscos, em particular porque a MA evolui para componentes cada vez maiores. Os sistemas de voo e de aterragem podem sofrer alguma desintermediação, especialmente se produzir em regime *built to print* em vez de *built to spec*, ou seja, se produzir em regime de subcontratação

¹² *Outsourcing* refere-se à sub-contratação de serviços.

¹³ *Dual-sourcing* é ter dois fornecedores para um dado componente, matéria-prima, produto ou serviço.

¹⁴ *Aftermarket* é o mercado secundário que fornece bens e serviços.

contra especificações geradas por entidade projetista, respetivamente. Provavelmente passarão do nível 1 da cadeia de abastecimento para o nível 2 e o nível 3. Os fabricantes de motores também sentirão alguma pressão, mas podem transmiti-la para os seus próprios fornecedores e podem aproveitar a MA para seu benefício. No entanto, podem ter que aumentar continuamente o investimento em I&D para manter sua relevância para o setor. Por outro lado, a MA pode beneficiar fornecedores especializados de equipamentos de impressão 3D (Stratasys, por exemplo) e grupos maiores que produzem peças como a GE.

Tabela 4 - Risco de rutura da cadeia de abastecimento (Credit Suisse, 2017).

	3D printing	Examples of key Tier 1s & Tier 2s
Aerostructures and parts	-	Spirit, GKN, Senior, Latecoere, Daher, Triumph, MHI, IHI, Figeac Aerospace, Orbital ATK, Sonaca, PCP, ATI, Hexcel
Cabin equipment	-	Rockwell Collins, Zodiac, FACC, Astronics, Heico, Jamco
Seats	-	Rockwell Collins, Zodiac, Recaro
Engines and parts	+	GE, Rolls-Royce, United Technologies, Safran, MTU, Barnes, Woodward, Meggitt, Heico, Esterline, PCP, ATI
Avionics and parts	=	Rockwell Collins, Honeywell, Thales, GE, Esterline
Flight systems (fuel, etc.) and parts	-	Safran, Zodiac, Eaton, Parker Hannifin, Honeywell, United Technologies, Heico, Curtiss-Wright, Esterline, Moog
Landing systems, wheels & brakes	-	Safran, United Technologies, Heroux Devtek, Meggitt

Para além da prototipagem, reparação e produção de ferramentas (*tooling*), no que toca à manufatura rápida/direta, como já foi dito, a maioria da sua aplicação cobre estruturas secundárias e terciárias ou até não estruturais. Para além disto, embora tenham sido apresentados bastantes exemplos de componentes fabricados por MA e ainda haja com certeza outros mais que não foram apresentados, há ainda poucos componentes MA a voar, pois estes têm que ser certificados. Nota-se sobretudo que os componentes metálicos só recentemente começaram a obter certificação para voar. Fez-se referência ao encaixe do sensor de temperatura produzido pela GE, em fevereiro de 2015, sendo que a aprovação de dois outros componentes, o *turbine nozzle* para um APU da GE e um componente em titânio da *Norsk Titanium* para integrar o *Dreamliner*, surgiram em junho de 2017.

4.1.2. Regulamentos EASA/FAA

Sendo o setor aeronáutico altamente regulamentado, para assegurar a segurança e melhorar a qualidade dos produtos, processos e serviços, estes têm de ser submetidos a normas industriais especificadas antes de serem introduzidos no mercado. Esta qualificação envolve, necessariamente, rigorosos e longos ciclos de desenvolvimento e implementação. O tipo de cargas a que peça vai estar sujeita ou ambiente operacional também determinam a simplicidade ou não da certificação. Uma estrutura terciária há de ter um processo de certificação mais simples do que uma primária.

Depois de respeitadas as normas industriais, os requisitos de um componente de uma aeronave comercial devem obedecer aos regulamentos da FAA e EASA, que devem ser cumpridos antes que um *Type Certificate* possa ser emitido para uma determinada série de aeronaves, necessária para a entrada ao serviço numa companhia aérea. No caso, por exemplo, do componente estrutural de titânio, a *Boeing* trabalhou com a *Norsk* desde o início de 2016 até fevereiro de 2017 para passar um rigoroso programa de testes da FAA para os componentes obterem a sua certificação. Entretanto, a *Norsk* espera também obter aprovação adicional da FAA para as propriedades do material e para o processo usado, pois isso permitirá a produção de componentes sem se ter que obter aprovação para cada um deles, levando a ainda mais poupança por aeronave.

É de salientar que a EASA não aprova normas de inspeção, materiais ou processos, mas aceita-os como parte de um projeto, desde que sejam provados validados, aplicáveis e repetitivos e reitera que a tecnologia e mudanças na aplicação da tecnologia não devem reduzir o nível aceitável de segurança (EASA, 2016).

O anexo 1 do regulamento EC No.216/2008, que estabelece os requisitos essenciais para a aeronavegabilidade, relativamente às estruturas e materiais refere no ponto 1.a: *“1.a. Structures and materials: the integrity of the structure must be ensured throughout, and sufficiently beyond, the operational envelope for the aircraft, including its propulsion system, and maintained for the operational life of the aircraft.”*

Algumas regras da EASA referentes aos materiais, métodos de fabricação e propriedades de resistência mecânica incluem:

- (1) **Regra CS 2x.603:** referente aos materiais, diz que a adequação e durabilidade dos materiais utilizados para peças, cuja falha pode prejudicar a segurança, deve basear-se: na experiência/teste; estar em conformidade com as especificações aprovadas, que asseguram a resistência e outras propriedades; na informação de projeto e ter em conta os efeitos das condições ambientais;
- (2) **Regra CS 2x.605:** referente aos métodos de fabricação, diz que estes devem produzir uma estrutura consistentemente sólida. Se um processo de fabricação (como soldadura ou tratamento térmico) requerer um controlo mais próximo para atingir esse objetivo, o processo deve ser realizado de acordo com uma especificação de processo aprovada.
- (3) **Regra CS 2x.613:** referente às propriedades de resistência mecânica, diz que estas se devem basear num número suficiente de testes a materiais que atendam as especificações aprovadas para estabelecer valores de projeto numa base estatística.

A EASA formou um grupo de trabalho responsável pelo tema da MA, cujo objetivo passa por analisar e avaliar riscos, mitigação de riscos e trabalhar conjuntamente com outros reguladores e indústria para ajudar a garantir a integração segura das tecnologias de MA em

desenvolvimento na aviação (EASA, 2016).

Ora, apesar do setor estar a dar os primeiros passos nesta tecnologia, o facto de ter sido já obtida certificação de componentes estruturais pelas autoridades de aviação como a EASA e FAA é uma prova de que esses mesmos componentes têm as características necessárias para desempenhar a mesma função daqueles que substituíram, produzidos por métodos tradicionais. Para produzir consistentemente peças com propriedades idênticas e conhecidas, o material e o processo usado para formá-lo devem ser extremamente bem entendidos. Estas certificações acabam por também gerar nas empresas confiança nos processos de MA, assim como nos materiais usados e produtos resultantes. Para além de que são um motor para o crescimento futuro da indústria de MA. Muito provavelmente estas autoridades começarão a ter listas infundáveis de componentes para aprovar no futuro.

4.1.3. Limitações das tecnologias de MA

Apesar de tudo, a MA não é uma panaceia. Não pode ser vista como uma substituição universal dos métodos tradicionais de fabricação. Há que ter em conta o custo da matéria-prima e do próprio processo. Kobryn et al. (2006) retratam o seguinte exemplo: componentes estruturais como nervuras e longarinas são geralmente obtidos por forjamento, o que resulta em razões *buy-to-fly* elevadíssimas. Para estes componentes, o processo *near-net-shape* característico da MA providencia, por isso, uma gama alargada de benefícios. No caso de componentes de titânio, em que os custos de matéria-prima são mais elevados e a maquinaria é mais difícil, a MA tem um maior potencial para reduzir o custo de aquisição. No entanto, no caso de ser usadas ligas de alumínio, em que a matéria-prima e a maquinaria não são excessivamente caras, o custo de produção total é mais económico face ao custo do processo da MA e da sua matéria-prima.

De facto, nem todos os componentes ou geometrias podem ser fabricados por MA. Não chega conhecer as características e benefícios do processo. É necessário ter um conhecimento acerca de todo o desenvolvimento do produto e processo de produção. O projetista tem um impacto considerável nos custos da peça e precisa de conhecer a influência dos fatores nos custos totais. Da mesma forma, aquando da conceção da peça, precisa já de ter em mente que métodos de teste poderão ser usados para a peça, pois no caso de peças com geometrias complexas, os métodos não destrutivos atuais como a tomografia computadorizada podem não ser suficientes (Reiher, Lindemann, Jahnke, Deppe, & Koch, 2017). É por isso que as empresas têm que usar uma abordagem holística ao mesmo tempo em que integram e aplicam a MA na sua gama de produtos e tecnologia, de forma a explorar com sucesso todo o potencial que a tecnologia oferece.

O processo de desenvolvimento de um produto deve começar pela seleção das peças apropriadas. Esta seleção deve passar por encontrar um componente que possa ser produzido por MA, que traga benefício económico e que possa ser usado como produto final (Reiher, Lindemann, Jahnke, Deppe, & Koch, 2017). Depois do componente escolhido é benéfico redesenhá-lo, na medida em que as peças convencionalmente concebidas são muitas vezes dificilmente produzidas por MA. Este novo desenho deve ser feito com base num conhecimento profundo do componente. Portanto, informações detalhadas sobre a função, cargas a que vai ser sujeito e restrições devem ser conhecidos.

A MA hoje em dia ainda é considerada um processo caro e, portanto, é preciso justificar o seu uso em detrimento dos métodos de fabricação tradicionais. Uma pesquisa com uma amostra de um componente metálico, em aço inoxidável, procurou identificar quais os fatores que causavam maiores gastos na MA. Os fatores incluíam: custos da máquina, custos e processos de acabamento, custos de material, uso do forno, custos de preparação e intervenções no processo de construção. Fizeram-se variar a taxa de deposição, a utilização da máquina, os custos de material e os custos de investimento da máquina. Os fatores mais salientes foram o custo da máquina e os custos do material que, respetivamente, ocupavam, em média, 73% e 12% do custo total (Lindemann, Jahnke, Moi, & Koch, 2012). Mas para estimar os benefícios da MA, deve ser levada em consideração uma abordagem baseada no ciclo de vida do componente produzido que, no setor aeronáutico, rapidamente traz poupanças como já foi referido.

No caso da empresa *Northrop Grumman* foram identificadas mais de 1400 peças, num avião militar, as quais compensavam ser fabricadas por PBF, mas a tecnologia existente ainda não o permite. Seria necessário um material com resistência a temperaturas mais altas (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015). Neste caso, falha o material adequado, noutros falham as próprias normas que ainda nem existem.

Algumas empresas do setor têm feito pesquisas intensivas. No entanto, todo esse *know-how* permanece na empresa, sem ser divulgado (Deloitte University Press, 2014). Cada fabricante terá especificações internas ou procurará organizações de padrões estabelecidas para obter dados que permitam o *design* preciso de componentes de um determinado material.

O projeto ManSYS (2017) financiado pelo FP7 define que para cada aplicação específica e processo de produção, existem vários elementos que são importantes para determinar a qualidade do produto final. Os principais elementos especificados são: tolerâncias dimensionais, porosidade, microestrutura, tensões residuais, rugosidade da superfície, resistência à tração e análise da composição química.

Para validar a qualidade da peça são usados testes destrutivos e não destrutivos. Mas as geometrias complexas produzidas com as tecnologias MA podem ser difíceis de inspecionar, pois podem incluir características internas, que são difíceis de detetar com métodos de teste

convencionais. Nos métodos destrutivos é usada uma amostra, que é produzida juntamente com a peça, para validar a sua conformidade. As amostras são produzidas em várias orientações de construção para fornecer informações sobre o desempenho da peça e o processo de produção.

Os métodos de ensaio não destrutivos adequados para AM incluem: tomografia computadorizada de raio X, medição da porosidade interna, tolerâncias dimensionais, microscopia eletrônica de varrimento, rugosidade e porosidade da superfície, difração de nêutrons/raio X e medição de tensões residuais. Do mesmo modo é possível recorrer a métodos em voga no domínio da *structural health monitoring* (SHM), já hoje usados em aeronaves militares, e.g., EH101, C-295M.

Algumas das normas em utilização pela ASTM (2017), relativas aos métodos de teste da MA, compreendem: Prática padrão para registo de dados para amostras de teste obtidas por MA (F2971-13); Guia padrão para avaliar propriedades mecânicas de materiais metálicos obtidos por MA (F3122-14); Terminologia Padrão para Manufatura Aditiva - Sistemas de Coordenação e Metodologias de Testes (ISO / ASTM2921-13). Enquanto uma das normas para aprovação inclui: Propriedades mecânicas dependentes da orientação para MA de peças metálicas (WK49229).

Relativamente às normas de materiais e processos, a ASTM (2017) tem já normas publicadas para o uso das ligas de Ti-6Al-4V, de níquel, de aço inoxidável e materiais plásticos para o processo PBF. Assim como guias-padrão para: a caracterização das propriedades de pós metálicos usados na MA; o processo DED de metais. Não obstante, há já 20 normas para aprovação (em setembro de 2017). Algumas delas são: especificações de matéria-prima metálica para PBF; receção e armazenamento de pó metálico usado em PBF; reciclagem do pó metálico em PBF; limpeza das máquinas PBF para material metálico; requisitos das instalações para PBF de metal; calibração das máquinas PBF para metal; processo de tratamento térmico das peças metálicas PBF; e Extrusão de material com materiais plásticos.

A maior parte destas normas inclui guias e especificações relativas ao processo PBF para matéria-prima metálica o que evidencia uma tendência proveniente, com certeza, de uma necessidade da implementação deste processo, dos mais usados em aeronáutica. É importante que se continuem a desenvolver estas normas, cuja ausência foi tão referida pelos OEM, no capítulo anterior, como o principal obstáculo à implementação da MA.

A FAA (2017) identifica os seguintes pontos onde há atualmente ainda pouco conhecimento e experiência:

- (1) Caracterização dos defeitos do material e o seu impacto sobre a aeronavegabilidade das peças metálicas produzidas em MA;
- (2) Entendimento sobre os modos de falha do processo e sua relação com os parâmetros de produção;
- (3) Caracterização das propriedades mecânicas das peças metálicas;

(4) Processo de produção estável e repetitivo.

A anisotropia é identificada pela FAA como uma diferença significativa existente entre os componentes metálicos fabricados por MA e por métodos convencionais. Esta dificulta a previsão dos modos de falha, da carga para a qual se dá a falha, assim como a localização do dano.

4.1.4. Potencial evolução da MA no setor

Brandt (2016) identifica a necessidade de desenvolver sistemas CAD que ultrapassem as limitações da modelagem paramétrica e representação dos limites aquando da construção de peças com geometrias muito complexas e de melhorar os processos de controlo do processo. São necessários novos desenvolvimentos das tecnologias MA para reduzir a duração do processo, aumentar a fiabilidade e a qualidade, integrar materiais de gradiente funcional e expandir a escala de aplicação. É necessário o desenvolvimento de novas máquinas, novos materiais, formação para os *designers* e engenheiros, colaborações e parcerias.

Consórcios como o representado na Figura 27, formado para o projeto do *Bionic Aircraft*, podem estar na solução destas lacunas ainda existentes. A colaboração entre empresas de MA (fabricantes de máquinas e materiais) com OEMs e até com entidades educacionais pode desempenhar um papel importante no desenvolvimento da tecnologia. A *Boeing*, por exemplo, colaborou com os seus fornecedores no desenvolvimento daquele que viria a ser o primeiro material ignífugo processado por laser. Em meados de 2017 foi anunciada uma parceria entre a *Concept Laser* e a *LAUAK*¹⁵: a *Lauak* irá investir nas máquinas da *Concept Laser* e passar a ser cliente e a *Concept Laser* trabalhará em estreita colaboração com a *Lauak* para implementar processos aditivos e projetar novos produtos. Também a *Airbus APWORKS* irá colaborar com a *Dassault Systèmes* para promover o uso de MA para produção em série; a *Boom Supersonic* escolheu a *Stratasys* para contribuir para o desenvolvimento da sua aeronave supersónica e a *Norsk* assinou em 2016 um contrato com a *Thales Alenia Space*, para desenvolver, produzir e testar componentes.

Um outro tipo de colaboração que é esperado acontecer é com as entidades legisladoras na prevenção de ataques cibernéticos, a fim de proteger a cadeia de valor (Cecimo, 2017). O arquivo CAD que contém o *design* digital do produto pode ser roubado ou corrompido. Na fase de produção, os riscos estão ligados à alteração dos parâmetros de processo adequados, levando a situações como a cabeça da impressora desalinhada ou a intensidade do laser alterada.

¹⁵ Empresa francesa com instalações de produção aeronáutica em Portugal.

O uso da MA na aviação tem vindo a expandir. Várias pequenas empresas de serviços de MA foram criadas para atender o mercado espacial (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015). Por outro lado, à medida que mais patentes expiram, haverá oportunidades para capitalizar a tecnologia e desenvolver novos sistemas. Estes novos sistemas provavelmente fornecerão ofertas de produtos adicionais e aumentarão a concorrência entre os fabricantes.

É possível que toda a cadeia de processo sofra inovações. A nível de engenharia e software, a gestão de projeto respeitará o conceito ágil e será integrado *software* especializado de MA no convencional CAE, compreendendo métodos de *design* generativo.

Relativamente ao tamanho das máquinas é muito provável que este aumente ou que surjam outras soluções de forma a ser possível construir peças de maiores dimensões, abrindo novas oportunidades para componentes metálicos estruturais e peças de polímero funcionais. A GE anunciou em 2017 que está a criar a maior máquina PBF, com um “envelope de impressão” de 1m³, adequada para a fabricação de componentes estruturais de motores a jato e peças para aeronaves de tipo *wide body* com único corredor (GE Additive, 2017).

No caso da máquina em si, a evolução é no sentido do conceito multi-laser e da monitoração e automação do processo. É expectável uma otimização entre tempo, custo e qualidade, na medida em que o conceito multi-laser e as máquinas híbridas permitem integrar as técnicas MA nos processos convencionais e, portanto, a redução do tempo de construção. Por outro lado, a automação restringe a função do operador apenas à monitoração e a dar início ao processo, não necessitando de retirar a peça da câmara de construção nem de a preparar para a próxima construção, diminuindo o custo. Em relação à qualidade espera-se que esta seja superior já que se espera haver controlo do processo em tempo real. Atualmente há já máquinas de MA que integram módulos como processos de acabamento, tendo surgido mais recentemente um processo designado *micro machining process* (MMP), que é um tratamento de superfície seletivo (MMP Technology, 2017). Mas novos desenvolvimentos na precisão, que são necessários, culminarão numa quantidade mínima de acabamento.

É expectável que haja uma abertura do mercado dos materiais a fornecedores, acabando o monopólio da exclusividade e passando as máquinas a ser compatíveis com outros materiais para além daqueles ditos “originais”, contribuindo para a variedade de materiais e, conseqüentemente, para a variedade de outras aplicações que daí possam advir.

À medida que for vendido mais material e que mais fabricantes entrem no mercado, os custos do material irão diminuir. Portanto, a influência do material escolhido sobre o custo total, especialmente para produção de baixo volume, diminuirá.

Posto isto, o impacto expectável será uma diminuição significativa do custo da peça e um crescimento exponencial do mercado de MA.

O aumento da qualidade e a diminuição dos custos aumentarão significativamente o número de possíveis candidatos a peças produzidas por MA. Portanto, o processo para justificar o uso da tecnologia MA será muito mais fácil em comparação com as possibilidades de hoje.

Ainda existe potencial para redução de custos na mão-de-obra, que incluem as intervenções de remoção do produto finalizado ou a preparação inicial do equipamento.

Relativamente aos materiais, devem surgir materiais de gradiente funcional (FGM) e cerâmicas compatíveis com esta tecnologia. Os engenheiros da GE estão a começar a explorar a manufatura de pás de turbina com mais de um material (U.S. Department of Energy, 2015). De facto, este é um exemplo de um componente que requer diferentes propriedades de materiais em diferentes regiões. A extremidade da pá deve ser resistente a altas temperaturas e ter rigidez suficiente para evitar que a pá se alongue significativamente durante a operação, já a raiz da pá deve ser dúctil e apresentar resistência à fadiga. Um outro exemplo são os materiais (*tiles*) das naves espaciais, que fazem parte do sistema de proteção térmica. Eles são feitos em cerâmica de forma a conferir proteção térmica aquando da reentrada do veículo na atmosfera terrestre. No entanto, os *tiles*, em cerâmica, têm tendência a fraturar como resultado da diferença abrupta entre as temperaturas a que é sujeito. Um material FGM que contenha cerâmica na superfície externa e metal na superfície interna pode eliminar a transição abrupta entre os coeficientes de expansão térmica, já que, por norma, o coeficiente de expansão térmica nos metais é superior à das cerâmicas. Desta forma, é conferida ao veículo proteção térmica com menor probabilidade de fratura do material. Como referido em 3.4.7. MA por deposição dirigida de energia - Directed Energy Deposition (DED), o processo DED possibilita a construção de componentes com este tipo de material.

A *Roland Berger* (2016) vai mais longe e aponta que uma possibilidade futura é também o desenvolvimento de processos de manufatura de multi-materiais para a tecnologia PBF, quer através de transições de material discretas ou contínuas (FGM), quer através de um processo mais complexo como o representado na Figura 53.

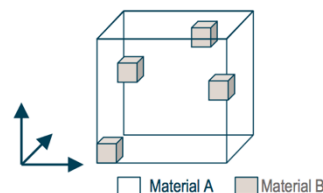


Figura 53 - Possibilidade futura de construção de componentes por PBF (Roland Berger, 2016).

A indústria aeroespacial também tem uma grande procura por componentes cerâmicos, especialmente os fabricados a partir de cerâmicas técnicas. Estas subdividem-se nas usadas em revestimentos como barreira térmica ou TBC (*thermal barrier coating*), que é o caso dado do

exemplo anterior da nave espacial e nas usadas em material compósito como reforço e/ou como matriz (CMC - compósitos de matriz cerâmica), de acordo com Silva (2017). As cerâmicas técnicas possuem uma excelente capacidade para suportar altas temperaturas, ambientes químicos agressivos, são leves e resistentes à compressão e flexão. No entanto, são manufaturadas por métodos de pressão e extrusão que colocam restrições significativas na geometria do produto cerâmico final e, como tal, restringem a liberdade do *design*. Não são suscetíveis de sofrerem processos de maquinação ou forjamento devido à pouca resistência à tração com baixa tenacidade e propensão à fissuração. Assim, os métodos de fabricação tradicionais estão a restringir o potencial de desenvolvimento no campo da manufatura da cerâmica, assim como a limitar a obtenção de materiais cerâmicos de gradiente funcional. Pelo facto da MA permitir geometrias mais complexas, é possível que comecem a surgir componentes cerâmicos fabricados por esta tecnologia que atendam aos crescentes requisitos de materiais das aplicações aeronáutica e espacial. É expectável que também surjam desenvolvimentos neste tipo de material.

Novos materiais, desenvolvimento das máquinas, melhorias nos processos e diminuição nos custos de produção possibilitarão o surgimento de novos componentes, alargando a gama de aplicações da tecnologia.

À medida que o conhecimento e experiência nos processos de MA aumentam, maior é a expectativa de crescimento na produção de componentes críticos e possibilidade de manufatura de peças maiores. É esperado que a utilização da MA na produção de componentes estruturais de motor cresça, tendo sido o *turbine nozzle* produzido pela *Safran* em junho de 2017 apenas o ponto de partida. Da mesma forma, devem surgir componentes estruturais primários. No capítulo anterior foi referido que uma das próximas etapas da Força Aérea Americana passará precisamente pela manufatura de peças de fuselagem que suportem cargas e o departamento da defesa americano já está a avaliar a MA para uma ampla gama de usos baseados no *design*, fabricação e reparação de aeronaves da Força Aérea (National Research Council, 2014). O DMRC, de acordo com a Figura 20, prevê a manufatura de estruturas *morphing*.

A *SmarTech* (2014) identificou, conforme a Tabela 5, os componentes de motor com potencial para serem fabricados por MA, devido à sua complexidade, necessidade de otimização no *design* ou por serem fabricados através de processos de maquinação complexos.

Espera-se cada vez mais a redução do número de elementos de ligação como é o caso dos parafusos que enfraquecem a integridade estrutural e elevam os custos. A MA permite um *design* multifuncional com redução na montagem de peças. Da mesma forma que já foram produzidos componentes com canais de refrigeração internos, é possível que se venha a integrar futuramente isolamento térmico e acústico, assim como elementos eletrónicos nos componentes.

De forma a evitar um grande inventário de peças sobressalentes, que não chegam a ser usadas e sendo que algumas se tornam obsoletas aquando da inovação no *design* das aeronaves, a MA tem o potencial de superar estes desafios da logística, pois permite, produção flexível para a volátil demanda de peças sobressalentes. Numa situação de AOG, embora implementando uma produção *lean*, a cadeia de abastecimento não é suficientemente rápida para fornecer uma peça de reposição necessária dentro do curto período de tempo que é comum no setor aeronáutico. No entanto, como referido anteriormente, a MA rapidamente torna a aeronave novamente operacional, permitindo à companhia aérea não perder mais dinheiro.

Tabela 5 - Componentes de motor com potencial para serem fabricados por MA (SmarTech, 2014)

Component	Reasons For AM Production
Airfoils	Complex, heavily machined part
Rakes	Complex; pressurized line
Guide Vanes	Complex, heavily machined part
Impellers	Optimized design
Turbine Blades	Lower potential scrap rates

Relativamente à reparação de componentes, é expectável haver um desenvolvimento, passando o processo a ser automatizado, uma vez que atualmente a maioria do tempo é gasto na fase de preparação para a reparação. De facto, a reparação de peças desgastadas e defeituosas é um conceito muito mais difícil do que a fabricação de uma peça completamente nova, pois a máquina tem que saber exatamente a posição da peça. Novos desenvolvimentos podem permitir a construção direta na geometria existente.

Relativamente ao espaço, a impressora 3D a bordo da ISS permitirá a impressão de peças no momento da necessidade. Por outro lado, projetos como o *Archinaut* permitirão a impressão de grandes estruturas, deixando para trás os limites dimensionais impostos pelo seu transporte desde a Terra.

4.2. Componente nacional

Dados os condicionalismos da presente investigação em termos de recursos e de tempo que permitissem obter diretamente junto de empresas portuguesas que já recorrem a MA dados que habilitassem a compreender o que estão a desenvolver, por onde estão a progredir, etc, surgiu oportunidade de contactar o CEIIA que se disponibilizou de imediato a permitir uma visita às suas instalações e ainda a transmitir a sua opinião sobre o tema.

Embora se reconheça que a visão de uma só entidade não permite a generalização à escala nacional, bem como a intervenção no domínio do projeto só agora começa a dar os primeiros passos com o envolvimento nacional no projeto (*built to spec*) da aeronave militar (fase do ciclo de vida das aeronaves em que há oportunidade de decidir sobre materiais a usar e por extensão os processos produtivos) entende-se que mesmo assim se trata de abordagem de relevo porque permite ter a visão alicerçada já em experiência concreta.

O CEIIA é um centro de engenharia e desenvolvimento de produto. No entanto, não tem certificação POA, emitida pela EASA.

A empresa tem já contribuído para o desenvolvimento de projetos do setor. Relativamente à MA, a empresa, parte de uma parceria, tem nas suas instalações um equipamento desenvolvido com envolvimento indústria nacional, a saber, ADIRA SLM-XL. O protótipo foi desenvolvido em colaboração com o Instituto *Fraunhofer* da Alemanha. A tecnologia de MA da máquina é a fusão em camada de pó.

No entanto, ela usa um processo inovador, a saber, o TLM (*tiled laser melting*), o qual permite o fabrico de peças com um volume maior que o da câmara de processamento. O conceito consiste numa divisão da área de trabalho em pequenos segmentos que são processados sequencialmente por uma câmara de processamento móvel.

A máquina promete ser capaz de produzir componentes metálicos de grandes dimensões. O objetivo é o estudo e desenvolvimento de uma série de parâmetros de forma a que seja, no fim, possível a evolução para diferentes configurações e adaptabilidade a aplicações e mercados. Desta forma, o know-how fica na empresa, algo que não é possível quando se adquire uma máquina comercializada em série, como é o caso da EOSINT P700, que a empresa também detém. Esta iniciativa tem uma duração de 3 anos.

Uma indústria alvo é precisamente a aeronáutica, da qual a Embraer foi identificada como fabricante interessado no seu desenvolvimento, mas não foram revelados no encontro com o CEIIA¹⁶ que componentes serão alvo da tecnologia.

O setor espacial e os UAV's foram identificados pela empresa como aqueles com maior probabilidade para ser usada a MA, atualmente, onde o baixo peso e os componentes pequenos e de baixo volume de produção justificam o seu uso.

Em relação a aeronaves propriamente ditas, foi dada a opinião realista de que ainda demorará algum tempo até que haja mais componentes certificados produzidos em MA a voar. De facto, as empresas a ter que escolher optam pelos métodos tradicionais que já conhecem e

¹⁶ O que reforça a dificuldade em obter elementos aeronáuticos concretos que serão produzidos em ambiente de MA.

cujas propriedades finais dos materiais são previsíveis. Não obstante, foi dada também a opinião de que a longo prazo, haverá provavelmente componentes estruturais primários a voar.

Como qualquer outra tecnologia, esta terá o seu tempo necessário de maturação, estando o processo mais atrasado na manufatura dos metais. Tudo dependerá também da exigência dos pedidos dos fabricantes às empresas de produção, que parece começarem a aperceber-se dos benefícios para as suas aeronaves quando usada esta tecnologia, embora seja dispendioso ou, ainda, dispendioso.

Capítulo 5 - Conclusões e trabalhos futuros

5.1. Síntese conclusiva

A presente dissertação de mestrado teve como objetivo perspetivar a utilização da manufatura aditiva no setor aeronáutico, recorrendo também às perspetivas sobre o tema de empresas de produção de componentes.

Para tal, foram feitas pesquisas no sentido de entender que benefícios a MA poderia trazer ao setor, foram identificados os vários processos MA segundo a classificação da ASTM e foram identificados vários exemplos de componentes fabricados em MA (manufatura rápida/direta), sendo que alguns já foram inclusive aprovados pelas autoridades de aviação. Da mesma forma, apresentaram-se exemplos de prototipagem rápida, *rapid tooling* e reparação rápida.

Tendo isto como ponto de partida, foi feita uma análise no sentido de perspetivar que tipo de componentes, serviços e materiais se esperam usar ou continuar a usar no futuro, não esquecendo as ações que serão necessárias tomar para eliminar as lacunas ainda existentes e facilitar o desenvolvimento da tecnologia de forma a poder ser cada vez mais usada no setor.

A análise feita deixou possível concluir que haverá poucas dúvidas quanto ao crescimento da integração da MA nas cadeias de valor das empresas de produção do setor. Estas empresas devem cuidadosamente avaliar o impacto que a tecnologia terá no seu desempenho, crescimento e objetivos de inovação.

A nível europeu, a MA tem a capacidade de combater a desindustrialização e ao nível da produção respeita o conceito *lean* e *agile*, os quais são tão importantes implementar nas cadeias de valor.

De modo a apurar que caminhos podem ser seguidos pela indústria nacional com apoio do CEIIA, o setor espacial e os UAVs foram identificados pela empresa como aqueles com maior probabilidade para ser usada MA.

Embora o setor espacial não tenha sido muito explorado nesta dissertação porque não era para esse ramo em específico o estudo, houve pequenas referências à atividade que está a ser desenvolvida no/e para o espaço com a MA.

De facto, a MA faz toda a diferença uma vez que é mais económico enviar para o espaço uma peça mais leve. A diferença de preço deverá ser, aliás, astronómica, sendo o uso da MA

facilmente justificável. Também no caso dos UAVs que requerem peças de menores dimensões, comparadas com as de um avião, o seu uso é justificável.

Também no CEIIA foi referido que as empresas tendem ainda a optar pelos métodos tradicionais. Não obstante, embora o investimento inicial em máquinas e matéria-prima compatível sejam apontados como os principais fatores a encarecer o uso da tecnologia, há que ter em vista o objetivo final que ela permite, a poupança no consumo de combustível ao longo do tempo de vida de uma aeronave.

De qualquer das formas, no CEIIA foi referido que a longo prazo haverá provavelmente componentes primários a voar, tal como foi dito ser expectável no último capítulo. A mais recente aprovação de um componente estrutural em titânio é talvez dos indicadores mais fortes que apontam para o crescimento contínuo da tecnologia em aeronáutica. Isto porque apesar da manufatura de metais estar mais atrasada, este acontecimento evidencia que começa a surgir conhecimento e experiência nessa área.

Vários OEM usam já técnicas MA, mas há ainda um longo percurso pela frente. Como foi referido nem todas as peças podem ser submetidas a esta tecnologia. O sucesso está também na seleção correta das peças. Mas acima de tudo, na eliminação das lacunas existentes no momento que são sobretudo ligadas à normalização.

Como qualquer outra tecnologia, esta terá o seu tempo necessário de maturação. Tudo dependerá, como referido no CEIIA, da exigência dos pedidos dos fabricantes às empresas de produção. E, portanto, do uso que as organizações DOA farão da tecnologia, mas é expectável que quanto melhor e mais adequada for a tecnologia, maior a probabilidade de ser usada, o que aumentará o leque de aplicações da tecnologia.

A indústria aeronáutica tem a oportunidade de liderar e a responsabilidade de contribuir com este campo revolucionário da tecnologia de fabricação.

5.2. Trabalhos futuros

Fruto do que foi possível observar, em termos nacionais afigura-se decisivo o envolvimento combinado:

- da indústria que projeta componente;
- das empresas com capacidade de desenvolvimento de equipamentos;
- de centros de investigação no domínio dos materiais;
- de centros de investigação aeronáuticos porque detêm competência sobre o assunto (testes, estruturas, etc)

- de entidades com capacidade de normalização/legislação normativa no domínio dos materiais.

Neste contexto, de forma a haver um alargamento nas aplicações possíveis com a MA no setor aeronáutico, é impreterível o desenvolvimento de especificações e normas dos processos e materiais compatíveis com o processo, tal como o desenvolvimento de máquinas novas que possuam maior câmara de construção ou então máquinas como a ADIRA SLM-XL que têm uma câmara de processamento móvel.

O aumento de velocidade de construção e da precisão também são importantes pelo que o desenvolvimento de cada vez mais máquinas híbridas com processos de acabamento integrados poupam tempo.

De igual modo é indispensável que se proceda à realização de investigação de novos materiais (no fundo matéria-prima) para manufatura aditiva com incorporação no *software* de novas ferramentas que deverão ajudar à expansão da utilização da MA no setor.

Bibliografia

Adams, C. (2017, February/March). 3D Printing: Hype, Hysteria or Good Plane Sense? *Aviation Maintenance*, 14-18.

Aerospace Manufacturing. (2017, may 9). Retrieved agosto 14, 2017, from <https://www.aero-mag.com>: <https://www.aero-mag.com/norsk-titanium-aerospace-grade-additive-manufactured-structural-components-boeing-787-dreamliner/>

Airbus. (2016, June 13). Retrieved maio 13, 2017, from <http://www.airbus.com/aircraft.html>: <http://www.aircraft.airbus.com/newsevents/news-events-single/detail/airbus-tests-high-tech-concepts-with-an-innovative-3d-printed-mini-aircraft/>

Airbus. (2016, March 3). Retrieved junho 1, 2017, from <http://www.airbus.com>: <http://www.airbus.com/newsroom/news/en/2016/03/Pioneering-bionic-3D-printing.html>

Aliakbari, M. (2012). *Additive Manufacturing: State-of-the-art, Capabilities, and sample Applications with Cost Analysis*. Master of Science Thesis, Department of Industrial Production, KTH.

All3DP. (2015, September 7). Retrieved abril 14, 2017, from <https://all3dp.com>: <https://all3dp.com/gartners-3d-printing-hype-curve-best-yet-come/>

AM Platform. (2014). *Additive Manufacturing Strategic Research Agenda*. Sheffield:Additive Manufacturing Sub-Platform.

ASTM. (2012). *ASTM F2792-12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. West Conshohocken, PA.

ASTM International. (2017). Retrieved julho 20, 2017, from <https://www.astm.org>: <https://www.astm.org/COMMIT/SUBCOMMIT/F4201.htm>

ASTM International. (2017). Retrieved julho 20, 2017, from <https://www.astm.org>: <https://www.astm.org/COMMIT/SUBCOMMIT/F4205.htm>

Autodesk. (2017). Retrieved agosto 30, 2017, from <https://www.autodesk.com>: <https://www.autodesk.com/customer-stories/airbus>

BionicAircraft. (2017). Retrieved maio 30, 2017, from <http://www.bionic-aircraft.eu>: <http://www.bionic-aircraft.eu/objectives>

BionicAircraft. (2017). Retrieved maio 30, 2017, from <http://www.bionic-aircraft.eu>: <http://www.bionic-aircraft.eu/consortium>

Boeing. (2016, August 29). Retrieved junho 20, 2017, from [www.boeing.com: http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page](http://www.boeing.com/features/2016/08/record-books-08-16.page)

Boeing. (2017). Retrieved junho 20, 2017, from [http://www.boeing.com: http://www.boeing.com/company/key-orgs/licensing/patents-and-technology.page](http://www.boeing.com/http://www.boeing.com/company/key-orgs/licensing/patents-and-technology.page)

Boric, M. (2017, march 24). Additive Manufacturing: How Airbus is printing the future. *Aircraft Maintenance Technology*, 28-33.

Brandt, M. (2016). *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies and Applications*. Cambridge: Woodhead Publishing.

Cecimo. (2017). *European Additive Manufacturing Strategy*. Brussels.

CEN. (2015, July 15). Business Plan CEN/TC 438 Additive Manufacturing. European Committee for Standardization (CEN).

Clean Sky. (2017). Retrieved maio 13, 2017, from [http://www.cleansky.eu: http://www.cleansky.eu](http://www.cleansky.eu/http://www.cleansky.eu)

Cominotti, R., & Gentili, E. (2008, December). Near net shape technology: An innovative opportunity for the automotive industry. *Journal Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* , pp. 722-727. Retrieved from [http://dl.acm.org/: http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1410999](http://dl.acm.org/http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1410999)

Credit Suisse. (2017, May 4). *Global Aerospace & Defence: Winter is coming; structural change likely for the aerospace supply chain*.

Deloitte University Press. (2014). *3D opportunity in aerospace and defense*. Retrieved agosto 8, 2017, from <https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/additive-manufacturing-3d-opportunity-in-aerospace.html#endnote-sup-18>

DMRC. (2011). *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing-Analysis of Promising Industries*. Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn.

DMRC. (2012). *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing-Future Applications*. Paderborn: Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn.

DMRC. (2013). *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing - Innovation Roadmapping of Required Advancements*. Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn.

DMRC. (2016). *Thinking ahead the Future of Additive Manufacturing-Seizing Oportunities for Business*. Heinz Nixdorf Institute, University of Paderborn.

Drwiega, A. (2017, April/May). State of the industry- Industry leaders discuss key issues facing aviation MRO. *Aviation Maintenance*, 20-38.

Dujin, A., Geissler, C., & Horstkotter, D. (2014). *Industry 4.0: The new industrial revolution- How Europe will succeed*. Roland Berger Strategy Consultants.

EASA. (2016). Additive Manufacturing (AM). *EASA workshop on Additive Manufacturing*. Cologne: EASA.

EASA. (2017). Retrieved agosto 28, 2017, from <https://www.easa.europa.eu>: <https://www.easa.europa.eu/faq/19466>

EFFRA. (2017). Retrieved maio 30, 2017, from <http://effra.eu/>: <http://effra.eu/factories-future-roadmap>

EMUSIC. (2016). Retrieved abril 8, 2017, from www.birmingham.ac.uk/generic/emusic/index.aspx: <http://www.birmingham.ac.uk/generic/emusic/about/index.aspx>

Ernst&Young. (2016). *If 3D printing has changed the industries of tomorrow, how can your organization get ready today?*

European Comission. (2013). *Factories of the Future - Multi-annual roadmap for the contractual PPP under Horizon 2020*. Luxembourg.

European Comission. (2014). *Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020 - Report from the EC Workshop on Additive Manufacturing held on 18 June 2014*. Brussels.

European Comission. (2014, Março 19). *Advancing Manufacturing - Advancing Europe' - Report of the Task Force on Advanced Manufacturing for Clean Production*. SWD(2014) 120. Brussels.

European Comission. (2015). *Additive Manufacturing: SASAM Standardisation Roadmap*. Additive Manufacturing Sub-Plataform.

European Comission. (2016, July 18). Retrieved maio 15, 2017, from <https://ec.europa.eu/jrc/en>: <https://ec.europa.eu/jrc/en/research/foresight/ilv2025>

European Comission. (2016, November 29). Retrieved abril 8, 2017, from https://ec.europa.eu/commission/index_en: http://cordis.europa.eu/project/rcn/199911_en.html

European Commission (Joint ResearchCentre). (2013, October). *A Manufacturing Industry Vision 2025. Foresight study*.

European Economic and Social Committee. (2013, Julho 11). *Stronger European Industry for Growth and Economic Recovery. Industrial Policy Communication Update. COM(2012) 582*. Brussels.

ExOne. (2017). Retrieved setembro 2, 2017, from <http://www.exone.com>: <http://www.exone.com/Industries-Applications/Industries/Aerospace>

FAA. (2008). *Aviation Maintenance Technician Handbook*. Oklahoma, USA: U.S. Department of Transportation.

FAA. (2017). AFS-300 Flight Standards Perspective on AM in Maintenance & Repair. *Gorham Conference - 2017- FAA Update on Additive Manufacturing*. San Diego.

Gamboa, P. V. (2014). Introdução às Estruturas de Aeronaves. *Estruturas Aeroespaciais I (10362)*. Departamento de Ciências Aeroespaciais. Covilhã: UBI.

Gamboa, P. V. (2014). O Processo de Projeto de Aeronaves. *Projeto de Aeronaves (10403)*. Departamento de Ciências Aeroespaciais. Covilhã: UBI.

Gartner. (2017). Retrieved abril 5, 2017, from www.gartner.com: <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp#>

GE Additive. (2017, June 22). Retrieved agosto 20, 2017, from <http://www.geadditive.com>: <http://www.geadditive.com/press-releases/ge-additive-creating-worlds-largest-laser-powder-additive-machine>

GE Aviation. (2016, October 31). Retrieved agosto 14, 2017, from <https://www.geaviation.com>: <https://www.geaviation.com/press-release/business-general-aviation/ge-tests-additive-manufactured-demonstrator-engine-advanced>

GE Reports. (2015, April 14). Retrieved julho 28, 2017, from <http://www.ge.com/reports/>: <http://www.ge.com/reports/post/116402870270/the-faa-cleared-the-first-3d-printed-part-to-fly/>

General Electrics. (2017). Retrieved maio 13, 2017, from <https://www.ge.com>: https://www.ge.com/sites/default/files/ge_brilliant_factory_boosting_productivity.pdf

Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (Second ed.). New York: Springer.

IATA. (2016, October 18). Retrieved agosto 1, 2017, from <http://www.iata.org/Pages/default.aspx>: <http://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2016-10-18-02.aspx>

ICAO. (2017). Retrieved agosto 1, 2017, from <https://www.icao.int/Pages/default.aspx>:
<https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/aircraft-engine-emissions.aspx>

InvestingAnswers. (2017). Retrieved junho 1, 2017, from <http://www.investinganswers.com>:
<http://www.investinganswers.com/financial-dictionary/businesses-corporations/work-process-wip-5176>

Investopedia. (2017). Retrieved junho 1, 2017, from www.investopedia.com:
<http://www.investopedia.com/terms/j/jit.asp>

Kobryn, P., Ontko, N., Perkins, L., & Tiley, J. (2006). Additive Manufacturing of Aerospace Alloys for Aircraft Structures. *Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-139* (pp. 1-14). Neuilly-sur-Seine, France: RTO.

KTN, M. (2012). *Shaping our National Competency in Additive Manufacturing-A Technology Innovation Needs Analysis Conducted by the Additive Manufacturing Special Interest Group for the Technology Strategy Board*. Materials KTN.

Lindemann, C., Jahnke, U., Moi, M., & Koch, R. (2012). Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing. *Proceedings of the 23rd Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin: University of Texas.

Loughborough University. (2017). Retrieved junho 7, 2017, from <http://www.lboro.ac.uk/?external>:
<http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/materialjetting/>

LZN. (2017). *lzn-hamburg*. Retrieved junho 1, 2017, from <http://www.lzn-hamburg.de>:
http://www.lzn-hamburg.de/fileadmin/user_upload/PDF_s/Flyer/LZN-branchenflyer-aerospace.pdf.

Made in Space. (2017). Retrieved agosto 25, 2017, from <http://madeinspace.us>:
<http://madeinspace.us/archinaut/>

Mansys. (2017). Retrieved setembro 2, 2017, from <http://www.mansys.info>:
www.mansys.info/publish/pages/8447/metrology_final_2.pdf

MMP Technology. (2017). Retrieved setembro 5, 2017, from <http://mmptechnology.com/site/>:
<http://mmptechnology.com/site/additive-manufacturing/>

Muniz, G. (2016). Additive Manufacturing and 3D-Printing Technologies in the EC. *CNRS Workshop on AM*. Paris: European Commission.

Muthu, S. S., & Savalani, M. M. (2016). *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing* (Vol. 2). Singapore: Springer.

National Research Council. (2014). *3D Printing in Space*. Washington, D.C.: The National Academies Press.

Norsk Titanium. (2017, June 19). Retrieved August 14, 2017, from <http://www.norsktitanium.com>: <http://www.norsktitanium.com/norsk-titanium-delivers-first-faa-certified-additive-manufactured-ti64-structural-aviation-components/>

Orme, M. E., Madera, I. J., Gschweidl, M., Ferrari, M., Mouriaux, F., Vernon, R., & Yancey, R. (2016). A demonstration of additive manufacturing as an enabling technology for rapid satellite design and fabrication. *SAMPE Long Beach 2016 Conference and Exhibition*. Long Beach.

Paderborn University. (2017). Retrieved June 17, 2017, from <https://www.uni-paderborn.de/en/>: <https://dmrc.uni-paderborn.de/content/research/internal-projects/direct-manufacturing-design-rules-20/>

Powder Metallurgy Review. (2011, August 24). Retrieved June 20, 2017, from <http://www.pm-review.com>: <http://www.pm-review.com/new-study-looks-at-the-potential-of-direct-metal-laser-sintering-technology-to-generate-energy-and-raw-material-savings/>

Priberam. (2017). Retrieved June 1, 2017, from www.priberam.pt: <https://www.priberam.pt/dlpo/biomim%C3%A9tica>

Priberam. (2017). Retrieved June 1, 2017, from www.priberam.pt: <https://www.priberam.pt/dlpo/bi%C3%B3nica>

Reiher, T., Lindemann, C., Jahnke, U., Deppe, G., & Koch, R. (2017). *Holistic approach for industrializing AM technology: from part selection to test and verification*. Switzerland.

Roland Berger. (2016). *Additive Manufacturing - next generation AMnx Study*.

Safran. (2017). Retrieved May 13, 2017, from <https://www.safran-helicopter-engines.com>: <https://www.safran-helicopter-engines.com/helicopter-engines/1000-2000-shp/arrano/arrano-1a>

Safran. (2017). Retrieved July 25, 2017, from <https://www.safran-power-units.com>: <https://www.safran-power-units.com/power-systems/auxiliary-power-units-apu/eapu60>

Safran. (2017, June 19). Retrieved July 25, 2017, from <https://www.safran-power-units.com>: <https://www.safran-power-units.com/media/safran-obtains-first-certification-3d-printed-gas-turbine-engine-major-part-20170619>

Scapolo, F., Churchill, P., Viaud, V., Antal, M., Hugo, C., & Smedt, P. (2014). *How will standards facilitate new production systems in the context of EU innovation and competitiveness in 2025?* European Commission. Luxembourg.

Schmid, H.-J., & Klemp, E. (2015). *Direct Manufacturing Research Center: Annual Report 2015*. Paderborn: DMRC.

Silva, A. (2017). Aula B2: Cerâmicas em construção aeronáutica e aeroespacial. *Materiais de Construção Aeroespacial*. Departamento de Ciências Aeroespaciais. Covilhã: UBI.

Silva, A. (2017). Aula B3: Materiais de gradiente funcional. *Materiais de Construção Aeroespacial*. Departamento de Ciências Aeroespaciais. Covilhã: UBI.

SmarTech. (2014). *Additive Manufacturing in Aerospace: Strategic Implications*. Charlottesville: SmarTech Markets Publishing.

sme. (2015, May). Retrieved março 14, 2017, from https://www.sme.org:https://www.sme.org/uploadedFiles/Publications/ME_Magazine/2015/May/May%202015%20f3%20Additive.pdf

Smithsonian.com. (2012, August 16). Retrieved maio 30, 2017, from <http://www.smithsonianmag.com: http://www.smithsonianmag.com/arts-culture/aircraft-design-inspired-by-nature-and-enabled-by-tech-25222971/>

Srivatsan, T., & Sudarshan, T. (2016). *Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications*. Boca Raton: CRC Press.

Stratasys. (2014). *Additive Manufacturing Trends in Aerospace: Leading the way*.

Stratasys. (2017). Retrieved junho 23, 2017, from <http://www.stratasys.com: http://www.stratasys.com/resources/case-studies/aerospace/nasa-mars-rover>

Teg. (2016). Retrieved junho 20, 2017, from <http://teg.com: http://teg.com/aircraft-parts-suppliers/>

The Living . (2017). Retrieved junho 2, 2017, from <http://www.thelivingnewyork.com: http://www.thelivingnewyork.com>

U.S. Department of Energy. (2015). *An Assessment of energy technologies and research opportunities*.

U.S.Army. (2016, February 16). Retrieved junho 20, 2017, from <https://www.army.mil: https://www.army.mil/article/162445>

Wohlers Associates. (2011). *Additive Manufacturing Technology Roadmap for Australia*.
Colorado: Wohlers Associates.

