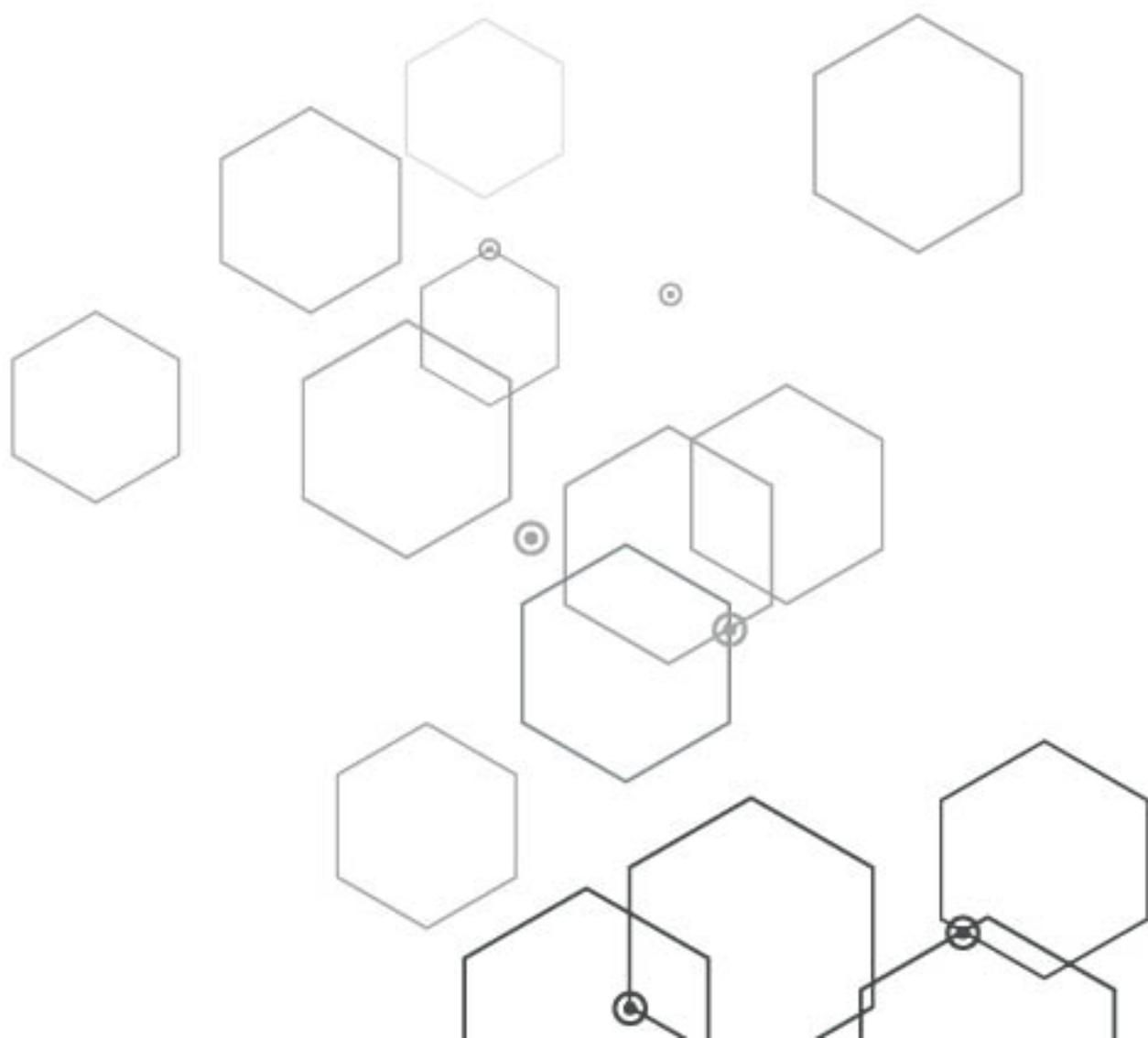


**ESTUDO E DIAGNÓSTICO DAS  
OPORTUNIDADES DA MANUFATURA  
ADITIVA METÁLICA PARA O SETOR  
AEROESPACIAL NA REGIÃO SUDOE**

# **ESTADO DA ARTE DAS TECNOLOGIAS DE MANUFATURA ADITIVA TENDÊNCIAS, OPORTUNIDADES, DESAFIOS E APLICAÇÕES PARA O SETOR AEROESPACIAL**



## ÍNDICE

1	ÂMBITO.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
2	TECNOLOGIAS DE FABRICO ADITIVO: ÚLTIMA GERAÇÃO .....	7
2.1	Introdução .....	7
	Benefícios e Limitações .....	11
	Classificação das Tecnologias da Manufatura Aditiva .....	13
	Cadeia de Fornecimento da Manufatura Aditiva .....	16
2.2	Tecnologias de Fusão em Cama de Pó (PBF) .....	18
	Fusão Seletiva por Laser (SLM) .....	18
	Fusão por Feixe de Eletrões (EBM).....	22
2.3	Deposição Direta de Energia para AM Metálica.....	25
	Manufatura Direta (EBAM™ -Fabrico Aditivo por Feixe de Eletrões EBF <sup>3</sup> ) .....	25
	Deposição Metálica por Laser (LMD -) .....	26
	Manufatura Aditiva por Fio e Arco (WAAM-).....	27
2.4	Comparação entre as Tecnologias de Fusão em cama de pó e Deposição Direta de Energia	30
2.5	Maturidade das Tecnologias AM .....	31
	Tecnologias de Fusão em Cama de Pó .....	31
	Fusão Seletiva por Laser (SLM -) .....	31
	Fusão por Feixe de Eletrões (EBM -).....	32
	Tecnologias de Deposição Direta de Energia.....	33
	Deposição Metálica por Laser (LMD -) .....	33
	Fabrico Aditivo por Feixe de Eletrões (EBAM®) .....	33
	Manufatura Aditiva por Fio e Arco (WAAM).....	34
2.6	Simulação Numérica na manufatura aditiva .....	35
	Introdução.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>
	Modelação com elementos finitos .....	36
	Software normalmente utilizado .....	38
2.7	Otimização Topológica .....	38
	Introdução.....	38
	Técnicas de otimização contínua .....	40
	Principais dificuldades com a otimização topológica do fabrico aditivo .....	40
	Software .....	41
2.8	Estratégias de scanning .....	42
3	MANUFATURA ADITIVA – OFERTA TECNOLÓGICA .....	42
3.1	Motivação e Potencial.....	42
3.2	Previsão .....	45
3.3	A oportunidade de mercado .....	48
	Europa.....	48
	Estados Unidos da América.....	50

Ásia.....	51
África do Sul .....	51
Austrália.....	51
3.4 <i>Enquadramento da Indústria.....</i>	51
Materiais metálicos atualmente disponíveis para a produção aditiva.....	56
3.5 <i>Tendências da Indústria Aeroespacial .....</i>	56
Introdução.....	56
Desafios da utilização da Manufatura Aditiva no setor aeroespacial .....	59
Tendências do setor Aeroespacial para a Manufatura Aditiva (AM) .....	61
Exemplos de componentes aeroespaciais na Manufatura Aditiva (AM).....	63
3.6 <i>Os Principais Intervenientes na Indústria da MAM no SUDOE .....</i>	68
3.7 <i>RESULTADO DA PESQUISA – “MAM FOR AEROSPACE”.....</i>	80
Introdução.....	80
Resultados.....	80
Metodologia.....	82
<b>4 RIS3 POLÍTICAS REGIONAIS DE APOIO Á MAM.....</b>	<b>82</b>
4.1 <i>Introdução .....</i>	82
4.2 <i>A cobertura da região SUDOE .....</i>	83
4.3 <i>O eixo SUDOE RIS3 e as prioridades em benefício da MAM .....</i>	84
<b>5 GLOSSÁRIO .....</b>	<b>89</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>92</b>

## Índice Ilustrativo

Figura 2-1. Previsões mundiais da indústria de impressão 3D para a venda de produtos e serviços AM (expressas em mil milhões e milhões de \$ respetivamente): previsão para 2013 e 2014 (à esquerda) e previsão para 2016 (à direita) [1].....	8
Figura 2-2. O Ciclo Hype de Gartner. Evolução da Manufatura Aditiva de 2013 até 2015. [5].....	10
Figura 2-3. Repartição da percentagem dos setores industriais utilizadores da AM [1].....	10
Figura 2-4. Dimensão do impacto em cadeia nos custos de produção (expressa em número de unidades ou volume de produção) (à esquerda), e no impacto da personalização nos custos de produção (à direita).....	12
Figura 2-5. Classificação dos processos da Manufatura Aditiva, fornecedores e fabricantes relacionados, tipo de materiais aplicados e setores de mercado [4].....	14
Figura 2-6. Processos de manufatura aditiva, ASTM F2792/ ISO17296-2 [8].....	15
Figura 2-7. Classificação dos processos de manufatura aditiva metálica.....	15
Figura 2-8. Descrição das tecnologias de Manufatura Aditiva Metálica [10].....	16
Figura 2-9. O processo completo de Manufatura Aditiva de uma peça metálica incluindo diferentes etapas [8] [11].....	17
Figura 2-10. Representação esquemática do processo de fusão seletiva a laser (SLM) [14].	19
Figura 2-11. Parâmetros de Scanning representados esquematicamente .....	20
Figura 2-12. Peça industrial fabricada através da tecnologia SLM pelo Centro de Investigação IK4-LORTEK .....	20
Figura 2-13. Vista esquemática do equipamento EBM- Electron Beam Melting [15].....	22
Figura 2-14. Vista esquemática do processo EBAM™ [18].....	26
Figura 2-15. Vista esquemática do processo DML .....	27
Figura 2-16. Diagrama esquemático dos processos a) GMAW, b) GTAW e c) PAW [57].....	28
Figura 2-17. Peça em Titânio (BAE systems spar) fabricada com o processo WAAM [58], [59].....	29
Figura 2-18. Ilustração do processo contínuo de otimização topológica .....	39
Figura 2-19. Ilustração do processo discreto de otimização topológica.....	39
Figura 3-1. Fluxo do Processo AM. [39].....	43
Figura 3-2. Fluxo da AM. [40] .....	44
Figura 3-3. Vendas de equipamento de AM. Fonte: Relatório Wohlers 2013 [41, 42].....	44
Figura 3-4. A AM aplicada aos grandes setores industriais [1] .....	57
Figura 3-5. Análise das componentes Preço vs. material (metal) taxa de deposição na AM, com o ponto de “break even” comparado com a manufatura com as máquinas tradicionais aos rácios típicos de “buy to fly” da indústria aeroespacial [27].....	59
Figura 3-6. Aplicação Espacial, desenvolvida pela CATEC e AIRBUS D&S: (a) montagem do ACU para o sistema de lançamento VEGA, (b) suporte de ligação original, (c) apoios otimizados: i. processo de produção em fase única (montagem integrada), ii. Otimização convencional; e iii. design biónico .....	61
Figura 3-7. Aplicação espacial desenvolvida pela CATEC e AIRBUS D&S (a) Suporte original de Hipparcos, (b) Suporte topologicamente otimizado, produzida através da SLM. ....	62

Figura 3-8. Spoiler biónico da aeronave desenvolvido pela Airbus. O design é inspirado na forma de um nenúfar [30].....	62
Figura 3-9. A partição biónica da Airbus foi exibida na Universidade Autodesk [30]......	63
Figura 3-10. (a) Modelo concetual de um Helicóptero; (b) Peça de teste para escape de gás [36].....	64
Figura 3-11. Protótipo fabricado pela SICNOVA.....	64
Figura 3-12. Alguns exemplos de peças industriais para moldagem e instrumentação na aeronáutica fornecidas pela AERNNOVA.....	65
Figura 3-13. (a) Injetor misturador para escape de turbinas de gás produzido pelo DED-LENS da Optomec, (b) peça suporte do compressor produzida através de PBF-EBM pela Arcam, (c) pá de turbina produzida através de PBF-SLM pela Concept Laser, (d) pás de turbina fabricadas através de PBF-SLM pela Morris Technologies.....	66
Figura 3-14. Suporte de telemetria produzido em Alumínio, aplicação espacial desenvolvida pela AIRBUS D&S: (a) versão original; (b) vista de componente otimizado..	67
Figura 3-15. Desenvolvimento de estruturas primárias do ARIANE5, pela CATEC e AIRBUS D&S: (a) Vista do LPSS e do lançador ARIANE5 (a faixa está montada juntamente com o Adapter of Useful Charge (ACU) – Adaptador de Carga Útil), (b) Componentes de AM fabricadas pela SLM, (c) Montagem do sistema, ensaio funcional.....	67
Figura 3-16. Estimativa da evolução do desenvolvimento e maturidade da Manufatura Aditiva de Metálica.....	80
Figura 4-1. Região SUDOE mapa 1.....	84

## Índice dos Quadros

Quadro 2-1. Vantagens das Tecnologias da Manufatura Aditiva.....	11
Quadro 2-2. Limitações das tecnologias da Manufatura Aditiva.....	13
Quadro 2-3. Vantagens e desvantagens da tecnologia SLM.....	21
Quadro 2-4. Descrição de materiais processados pela SLM.....	21
Quadro 2-5. Compação entre os processos de EBM e SLM.....	23
Quadro 2-6. Descrição das propriedades físicas e mecânicas dos materiais metálicos disponíveis para os diferentes processos de AM : PBF- baseado em laser e PB-baseado feixes de eletrões e diversas empresas.....	23
Quadro 2-7. Vantagens e desvantagens da tecnologia de Deposição do Metal a Laser.....	27
Quadro 2-8. Vantagens e inconvenientes dos processos WAAM.....	29
Quadro 2-9. Comparação dos processos AM: laser powder bed fusio vs. directed energy deposition [2], [22], [23].....	30
Quadro 2-10. Maturidade da SLM.....	31
Quadro 2-11. Maturidade da EBM.....	32
Quadro 2-12. Maturidade da LMD.....	33
Quadro 2-13. Maturidade da EBAM.....	33
Quadro 2-14. Maturidade do WAAM.....	34
Quadro 3-1. Aplicações Gerais da tecnologia AM na indústria automóvel, aeronáutica, espacial e de moldes [44].....	52
Quadro 3-2. Lista dos principais agentes da indústria de Metal AM.....	68

# 1 ÂMBITO

Este relatório “Diagnóstico e estudo das oportunidades das tecnologias de Manufatura Aditiva na indústria aeroespacial da região SUDOE” resume as contribuições para o Pacote de Trabalho 1 do projeto ADDISPACE, e agrega os resultados dos 3 estudos **“E.1.1.1 Estudo do Diagnóstico”, “E.1.2.1 Estudo das barreiras à adoção”, E.1.3.1 Estudo consolidado das oportunidades”**.

Este relatório global aborda o estado da arte das tecnologias de Manufatura Aditiva (AM), com uma ênfase especial nas tecnologias mais relevantes para o setor aeroespacial, as tecnologias de Manufatura Aditiva Metálica (MAM) denominadas *Power Bed Fusion* (PBF) e *Directed Energy Deposition* (DED).

Este relatório também descreve as tendências da aplicação das tecnologias da Manufatura Aditiva à indústria aeroespacial e as barreiras à sua adoção.

Finalmente, este relatório identifica as oportunidades da utilização dos Fundos Estruturais Europeus para financiamento das atividades de R&D MAM – Investigação e Desenvolvimento da Manufatura Aditiva Metálica e o seu enquadramento no RIS3 (Research and Innovation Strategy for a Smart Specialization) ou Estratégia de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente.

## 2 TECNOLOGIAS DA MANUFATURA ADITIVA: ÚLTIMA GERAÇÃO

### 2.1 Introdução

A Manufatura Aditiva (AM) refere-se ao conjunto de tecnologias utilizadas na construção de peças tridimensionais diretamente a partir da informação em 3D do desenho assistido por computador (CAD), através de uma estratégia de adição por deposição ou fusão de sucessivas camadas do material de base (pó ou fio metálico). A AM é o processo oposto aos processos convencionais de subtração de material a partir de um bloco sólido mediante processos de fabrico que passam por fases de fresar, tornear e retificar ou utilizando métodos de conformação, tais como compressão, moldagem por fusão ou moldagem por injeção.

Expressões como impressão a 3D, prototipagem rápida, manufatura digital direta, fabrico rápido e fabrico de formas sólidas livres são frequentemente utilizadas para descrever os processos da AM.

Embora a AM não vá substituir nenhum dos processos tradicionais de fabrico, ela representa o principal motor de inovação e tem potencial para complementar os processos tradicionais. A AM tem recebido cada vez mais atenção e esforços, em todo o mundo, já que existe um enorme interesse a nível mundial na avaliação do potencial da AM, enquanto tecnologia útil e revolucionadora. De facto, o entusiasmo gerado em torno da AM inclui muitos campos, desde a informática e design de produtos, novos materiais e incluindo Engenharia LEAN. Esta tendência está refletida em alguns indicadores, como a

previsão do crescimento mundial da indústria de impressão a 3D, onde uma tendência de aumento exponencial de 2014 até 2020 poderá ser observada (previsões de 2013, 2014 e 2016 estão incluídas na Figura 2-1) [1].

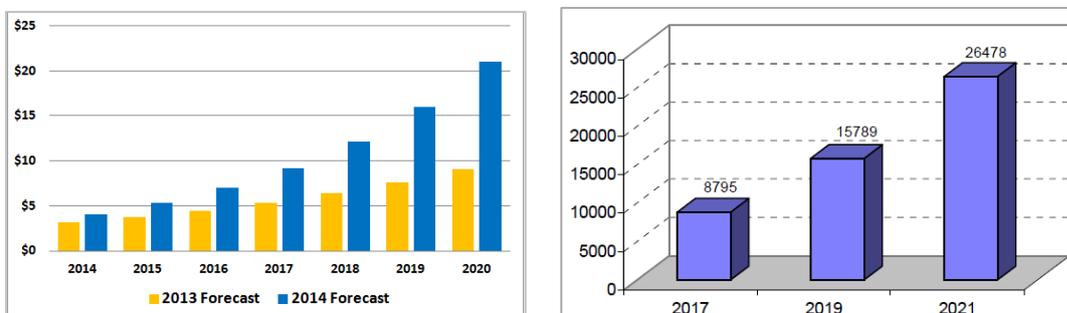


Figura 2-1. Previsões mundiais da indústria de impressão 3D para venda de produtos e serviços AM (expressos em milhares de milhões e milhões de \$ respetivamente): Previsão 2013 e 2014 (à esquerda) e previsão 2016 (à direita) [1].

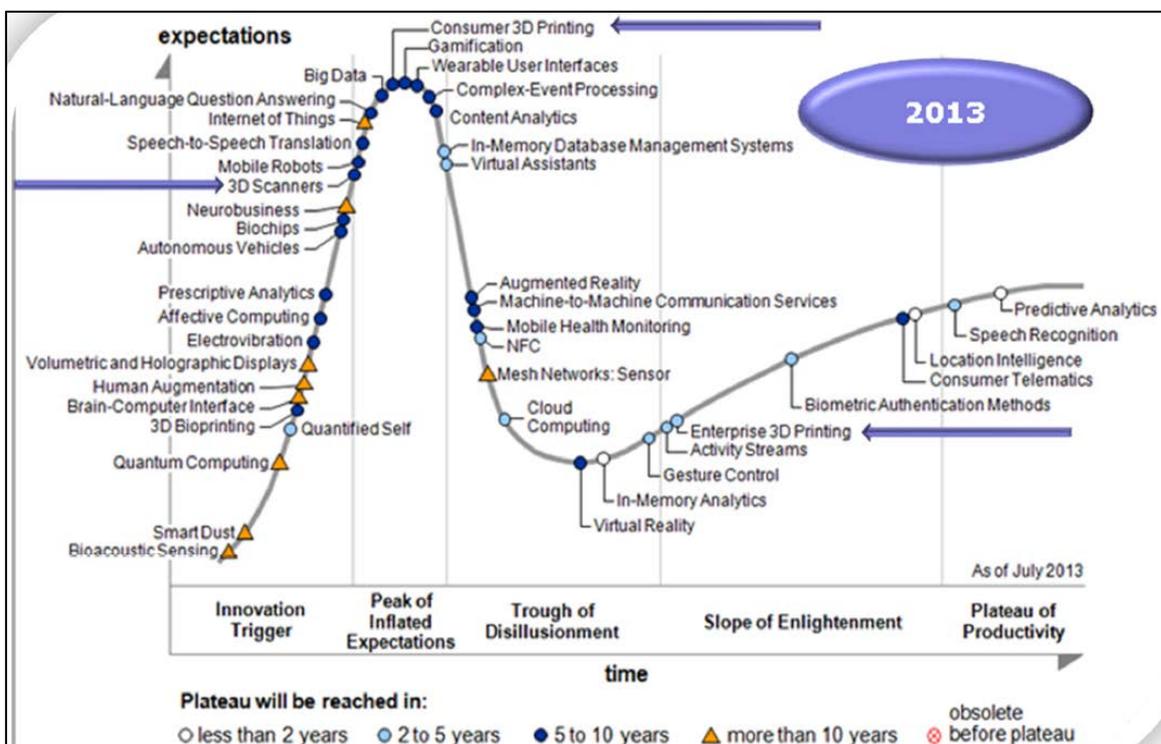
Com efeito, o número de países a explorar esta tecnologia tem crescido nos últimos anos. A adoção da AM está a evoluir rapidamente, sendo agora incluída nas competências base nacionais de diversos países. Nos Estados Unidos da América (EUA), o fabrico em 3D é um assunto de prioridade nacional, esperando-se fortes investimentos no campo da AM. De facto, a administração dos EUA lançou o National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII) (2012-13), com o objetivo de coordenar e financiar projetos de pesquisa em tecnologias de AM. Os países Asiáticos também estão a desempenhar um papel importante no desenvolvimento da AM; cerca de 30% do total dos sistemas industriais da AM estão instalados na região Ásia-Pacífico. Por seu lado a Europa, a utilização da AM com pós metálicos é um novo domínio industrial em crescimento [2]. Observando os mais recentes projetos Europeus financiados pelo European Framework Programme, foi alcançado um nível elevado em projetos e iniciativas de investigação em AM, em particular nas aplicações direcionadas para os setores médico e aeroespacial. Para além disso, estão a ser envidados esforços significativos no desenvolvimento e uniformização da tecnologia e no aumento da capacidade de produção de peças com AM [3].

O Ciclo Hype de Gartner, ferramenta de análise gráfica aplicada ao estudo da maturidade e/ou do nível de adoção e aplicação social de determinadas tecnologias, considera que as tecnologias da AM já têm mais de vinte anos de utilização no mercado da prototipagem rápida de peças plásticas para o design de produto [4]. Contudo, a atenção do público só se centrou na AM nos últimos anos quando as oportunidades da instrumentação e da produção direta de peças a partir de CAD chegaram aos plásticos, metais e cerâmicas. Aliás, até 2009, a AM nem sequer é referenciada no Ciclo Hype Gartner. Em 2010 a AM é atribuída pela primeira uma estimativa de 5-10 anos para adoção dessa tecnologia em âmbito generalizado (maturidade). Entre 2013 e 2015, as tecnologias AM aparecem progressivamente mais próximas do nível de produção real em muitos setores (i.e. fase da rampa de aprendizagem - "slope of enlightenment") (ver detalhes na Figura 2-2 [5]).

Nesta altura, vale a pena mencionar que a Figura 2-2 do Ciclo Hype de Gartner representa maioritariamente as tendências de adoção de tecnologias diferentes, e como

se constata as tecnologias AM já se estabeleceram em alguns setores ao nível da produção real (maior maturidade).

Como pode ser observado na Figura 2-3, e em resultado de um inquérito junto de mais de 100 fabricantes de sistemas de AM e de mais de 100,000 prestadores de serviços, utilizadores e clientes (o qual pedia a cada empresa para indicar as indústrias que serviam e os proveitos recebidos), mostrou que em 2014 as máquinas industriais/comerciais (incluindo equipamento de escritório, impressoras, computadores, routers) e equipamento de automação industrial (máquinas e robots CNC – controlo numérico por computador)), são os setores líderes das tecnologias AM. Seguem-se os produtos/eletrónicos de consumo e o setor automóvel. Os setores médico/dentário e aeroespacial mostram-se igualmente grandes utilizadores das tecnologias AM. [1].



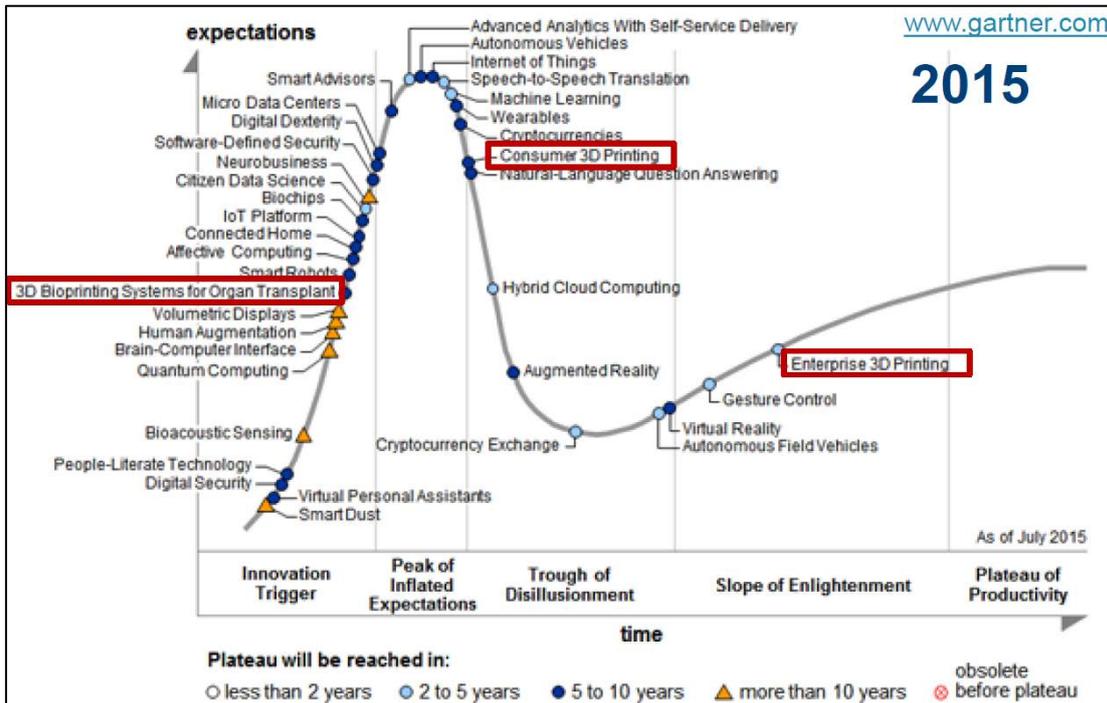


Figura 2-2. O ciclo Hype de Gartner, a Evolução da Manufatura Aditiva de 2013 até 2015. [5].

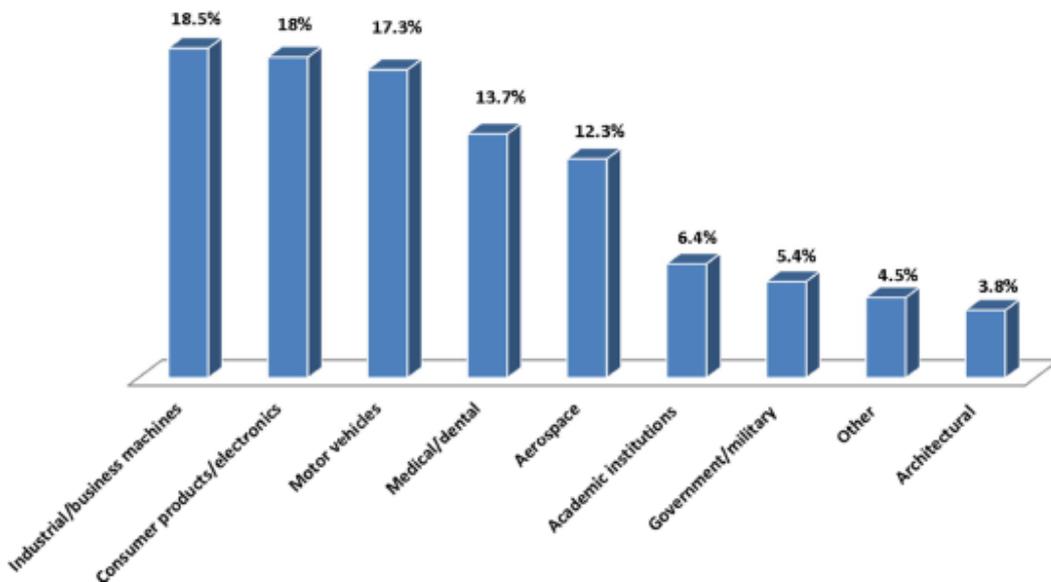


Figura 2-3. Repartição percentual dos setores industriais utilizadores da AM [1].

Apesar da AM mostrar já uma utilização significativa em setores específicos, existe ainda um grande potencial de aumento a sua utilização em novos setores.

Uma das atuais limitações à expansão da AM é o fato de muitos profissionais do setor da manufatura tradicional não conhecerem ou não entenderem as capacidades da AM. A AM tem o potencial e irá substituir métodos de fabrico tradicionais.

## Benefícios e Limitações

Presentemente, a AM de peças metálicas é reconhecida como uma alternativa interessante aos processos convencionais devido à sua capacidade de produzir peças complexas, com uma grande versatilidade no design e que torna possíveis estruturas com baixo peso e novas funções, tais como canais internos complexos. Além disso, o processo de produção em fase única (net-shape processes) demonstra ter muito menor consumo de matéria-prima, até 25 vezes menos, comparado com maquinagem. Este aspeto ganha importância no caso das ligas caras ou de maquinagem difícil e trás vantagens do ponto de vista ambiental [2], [4], [6].

Como referido, a AM tem benefícios significativos para uma vasta gama de aplicações, e impacto positivo nos elementos sociais, económicos e ambientais do desenvolvimento sustentável. As principais vantagens das tecnologias AM no Quadro 2-1.

*Quadro 2-1. Vantagens das tecnologias de Manufatura Aditiva.*

---

### Benefícios das tecnologias AM

---

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

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

O impacto nos custos de produção é analisado sob duas perspetivas: o volume de produção em série e a personalização de peças (Figura 2-4). Por um lado, o custo de produção tem um valor constante o que beneficia as pequenas séries AM. Por outro lado, a AM permite a personalização e produção de peças complexas com uma redução nos custos. Deste modo, **quanto mais pequenas forem as séries e mais complexas as formas, mais prováveis são os benefícios da AM.**

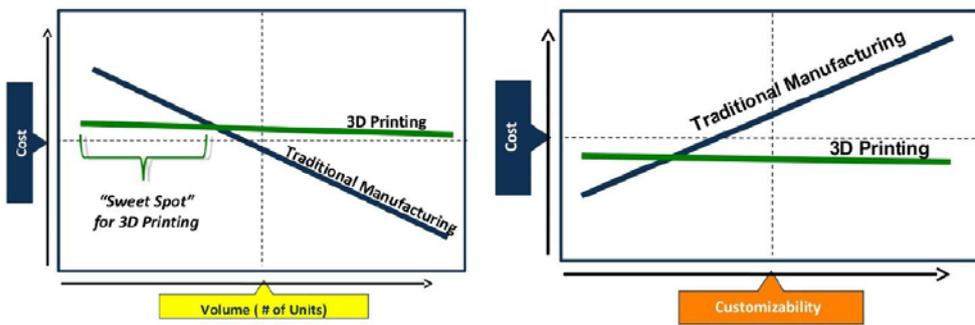


Figura 2-4. Impacto do volume das séries nos custos de produção (expresso em número de unidades ou volume de produção) (à esquerda), e impacto de personalização nos custos de produção (à direita).

Para além dos benefícios das tecnologias AM é importante conhecer algumas das limitações destas tecnologias (Quadro 2-2).

---

➤ Limitações das tecnologias AM

---

- Dimensão das peças: nas tecnologias powder bed a dimensão da peça é limitada à dimensão da cama de pó (Sistemas de powder bed padrão: 250x250x250 mm). Na direct energy deposition (ou laser metal deposition) a dimensão da peça é limitada pelo tempo e pelos custos de produção devido à baixa espessura das camadas de pó.
- Séries de produção curtas. A moldagem e a fusão ainda são preferenciais para elevados níveis de produção.
- Considerações de design. No caso das tecnologias powder bed são necessárias estruturas de suporte amovíveis sempre que o ângulo da saliência esteja abaixo dos 45°, com impacto na orientação das peças, na qualidade da superfície e no tempo de construção e custo da peça.
- Capacidade de processamento de materiais diferentes. Apesar de estarem disponíveis muitas ligas, os metais não soldáveis não podem ser processados por AM e as ligas de difícil soldadura requerem abordagens específicas.
- Propriedades do material: as peças feitas por AM tendem a mostrar anisotropia no eixo Z (direção da construção) e variabilidade do processo já que as propriedades da peça final dependem de um grande número de parâmetros, como a velocidade da construção ou a orientação da peça.
- O pós-processamento: é necessário remover os suportes do material após o fabrico. Em alguns casos a maquinaria é necessária para se obter um melhor acabamento da superfície ou precisão dimensional.
- Falta de uniformização específica.

---

## Classificação das Tecnologias de Fabrico

No quadro das tecnologias AM podem ser identificados diferentes processos, incluindo variedade de materiais (incluindo plásticos, metais, cerâmicas ou compostos), diferentes técnicas de deposição e diferentes formas da aplicação da fusão/solidificação aos materiais. As tecnologias de AM são tipicamente baseadas num dos **sete processos primários** de fabrico (os quais oferecem mais de 30 variações nos temas básicos). O Comité F42 da American Society of Testing Materials (ASTM - Sociedade Americana de Ensaios de Materiais) categorizou os processos da AM da seguinte forma [7]:

**1. Polimerização em cuba:** um fotopolímero líquido é seletivamente curado por ativação suave da polimerização.

**2. Material jetting:** gotas de um material de base (fotopolímero) e de materiais secundários (por exemplo, cera) são depositadas na área de construção. A luz UV solidifica o fotopolímero para formar partes curadas. O material de suporte é removido durante o processamento da pós-construção.

**3. Extrusão de material:** o material termoplástico é alimentado através dum injetor aquecido e depositado numa plataforma. O injetor derrete o material e extrusa-o para formar cada camada do objeto.

**4. Laminação de chapas:** as chapas finas dos materiais (plástico ou metal) são unidas usando uma variedade de métodos (por ex. cola, soldadura ultrassónica), por forma a

formarem um objeto. Um laser ou uma faca são utilizados para cortar o bordo à volta da peça desejada e o material desnecessário é removido.

**5. Powder Bed Fusion:** as partículas do material são seletivamente fundidas usando uma fonte de energia térmica laser. Assim que uma camada está fundida, é criada uma nova através da difusão de pó sobre o topo do objeto. O material não fundido é utilizado para suportar o objeto que está a ser produzido.

**6. Binder Jetting:** as partículas de material são seletivamente unidas usando um agente aglutinador líquido. Assim que uma camada está formada, uma nova camada é criada através da difusão de pó sobre o topo do objeto e o processo repete-se. O material não consolidado é utilizado para suportar o objeto que está a ser produzido.

**7. Direct Energy Deposition:** energia térmica concentrada é utilizada para fundir o material enquanto o mesmo está a ser depositado. Os sistemas de deposição direta de energia podem empregar técnicas baseadas em fio metálico ou técnicas de cama de pó.

Outras informações relevantes, incluindo o tipo de materiais, principais mercados e exemplos de empresas para cada um dos sete processos estão incluídos na Figura 2-5. As *tecnologias de Powder Bed Fusion (PBF)* e de *Direct Energy Deposition (DED)* são as mais importantes na AM metálica. Os polímeros são normalmente processados através do material jetting, extrusão de material e Fotopolimerização em cuba. As cerâmicas de alto desempenho são geralmente processadas através das tecnologias de fotopolimerização.

Process	Example Companies	Materials	Market
Vat Photopolymerization	3D Systems (US), Envisiontec (Germany)	Photopolymers	Prototyping
Material Jetting	Objet (Israel), 3D Systems (US), SolidScape (US)	Polymers, Waxes	Prototyping, Casting Patterns
Binder Jetting	3D Systems (US), ExOne (US), Voxeljet (Germany)	Polymers, Metals, Foundry Sand	Prototyping, Casting Molds, Direct Part
Material Extrusion	Stratasys (US), Bits from Bytes, RepRap	Polymers	Prototyping
Powder Bed Fusion	EOS (Germany), 3D Systems (US), Arcam (Sweden)	Polymers, Metals	Prototyping, Direct Part
Sheet Lamination	Fabrisonic (US), Mcor (Ireland)	Paper, Metals	Prototyping, Direct Part
Directed Energy Deposition	Optomec (US), POM (US)	Metals	Repair, Direct Part

Figura 2-5. Classificação dos processos AM, fornecedores e fabricantes, tipo de materiais aplicados e setores de Mercado [4].

Na Figura 2-6, os processos de AM são classificados em função do material de base utilizado (i.e. líquido, sólido ou pó) e de acordo com os processos primários já descritos [8]. Relativamente às tecnologias PBF e DED, é feita uma subdivisão dependendo do formato do enchimento do metal (fio ou pó) e da fonte de calor aplicada (laser, feixes de elétrons, arco).

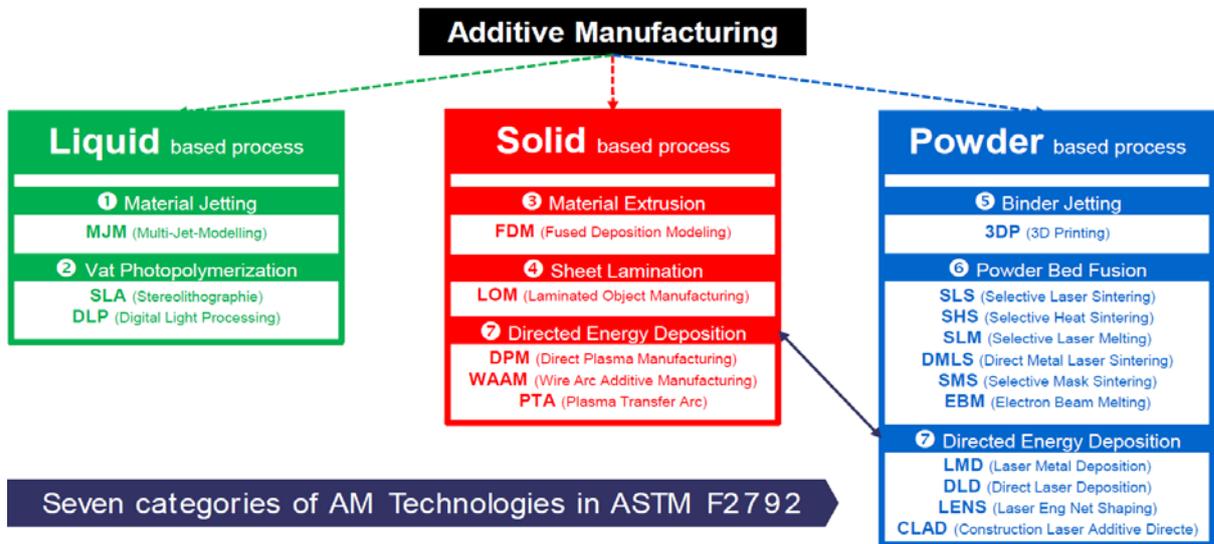


Figura 2-6. Processos de Manufatura Aditiva, ASTM F2792/ ISO17296-2 [8].

No caso particular das tecnologias AM para peças metálicas (MAM), a Figura 2-7 mostra uma classificação, incluindo os nomes dos processos adotados [9].

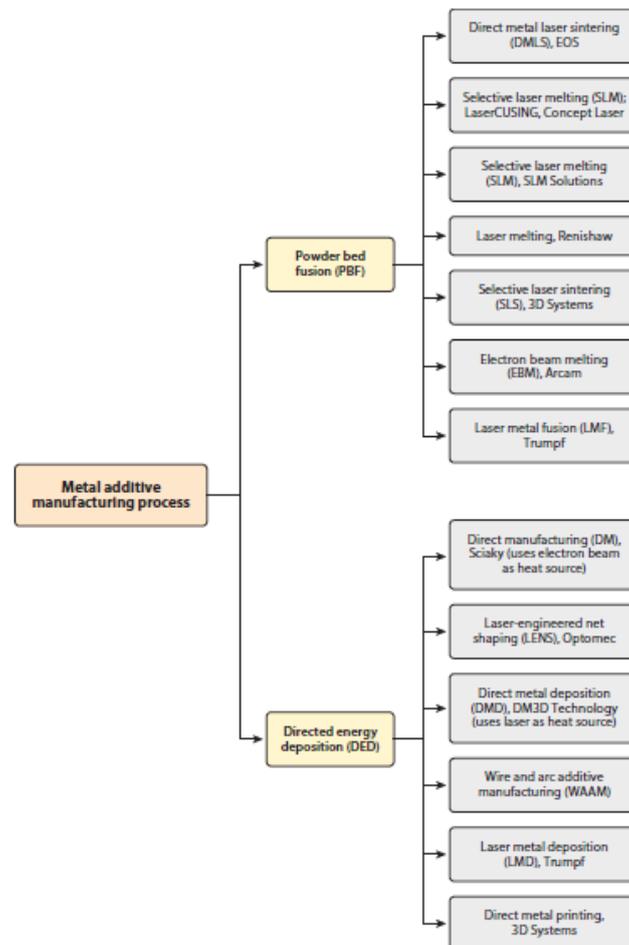


Figura 2-7. Classificação dos processos de manufatura aditiva metálica.

Na Figura 2-8 descrevem-se algumas das tecnologias MAM incluindo aplicações típicas [10].

	DEPOSITION				POWDER BED		
	LARGE SCALE DEPOSITION		FINE SCALE DEPOSITION		POWDER BED		
DESIGNATED ICON							
PICTURE							
DESCRIPTION	Deposition of wire fused using laser beam or plasma in a chamber to produce part		Deposition of wire fused using laser beam in a chamber to produce part	Deposition of powder fused using laser and local shielding to produce part	Laser beam selectively fuses powder on a bed in a chamber to produce part	Electron beam selectively fuses powder on a bed in a chamber to produce part	
APPLICATIONS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High material throughput deposition systems</li> <li>• Focus on Ti Large-scale pre-forms</li> <li>• Initial cost-driven introduction</li> <li>• Applications including large aero structure components</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lower material throughput deposition systems</li> <li>• Focus on Ti and Ni alloys</li> <li>• Add-ons and features</li> <li>• High value component repair and modification</li> <li>• Broad range of medium-size components; fabrications</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lowest material thru-put</li> <li>• Ti, Ni and steel alloys</li> <li>• Nearest-net</li> <li>• Intricate complex hi-value components</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low material thru-put</li> <li>• Ti6-4</li> <li>• Highly net-shape</li> <li>• Small – medium prismatic</li> </ul>

Figura 2-8. Descrição das tecnologias de AM metálica [10].

## Cadeia de Fornecimento da Manufatura Aditiva

A AM deve ser considerada como uma parte dos processos integrados. A representação esquemática do processo de fabrico pode ser observada na Figura 2-9. O fabrico de uma peça metálica usando tecnologias de manufatura aditiva começa com a modelação em 3D-CAD, scan 3D (engenharia invertida) e a criação de STL-data (triangulação). Depois a preparação de dados é organizada mediante a definição da orientação da peça, o posicionamento das estruturas de suporte e o corte do modelo. Quando os dados de controlo são gerados, inicia-se a produção das peças. Após o fabrico da peça, são necessárias operações de pós-processamento, incluindo remoção do pó e das estruturas de apoio, tratamentos de calor, pós-maquinagem, acabamento da superfície, ensaios não-destrutivos, etc.[11].

Etapas distintas podem ser consideradas na cadeia de valor da AM:

- **Matéria-prima.** A produção dos pós metálicos para os processos de AM exige um elevado nível de pureza e uma distribuição homogénea da dimensão granular. A qualidade do pó é a chave que determina as propriedades finais da peça, sendo obrigatórias especificações robustas para o pó de forma a assegurar uma boa reprodutibilidade. Estes pré-requisitos são difíceis de cumprir, nomeadamente para encomendas pequenas (não são muito atrativas para os grandes fornecedores). Presentemente, as matérias-primas são vendidas pelos fornecedores dos sistemas AM.

- Sistema. Deverá ter-se em conta que os fornecedores de sistemas oferecem baixos níveis de integração vertical. E os componentes standard são geralmente feitos por fabricantes subcontratados.
- Software. É importante diferenciar o controlo do processo e o melhoramento do software. O Controlo do processo é normalmente feito pelos fornecedores do Sistema. O Add-on software, como a geração automática de apoio ou a otimização do design, é normalmente fornecido por empresas especializadas.
- Design da aplicação. Relativamente ao design da aplicação para apoiar os clientes finais, deverá ter-se em conta que o design da aplicação pode ser complexo e exigente. É um tema complexo, geralmente feito por fornecedores de sistemas, os software developers e/ou os fornecedores de serviços. Mas nem todos os fornecedores são capazes de conceber as aplicações.
- Produção. Vários cenários de produção podem ser vistos no mercado: grandes OEM (fabricantes de marca própria), fabricantes subcontratados/fornecedores de serviços ou fabricantes em peças especializados.

Pode salientar-se, em geral, que o mercado AM está fragmentado por vários intervenientes. A dimensão dos agentes limita o investimento em R&D (nenhum interveniente consegue estar ativo em todos os campos). Como consequência, os fornecedores de sistemas de AM têm a gama mais vasta de atividades.

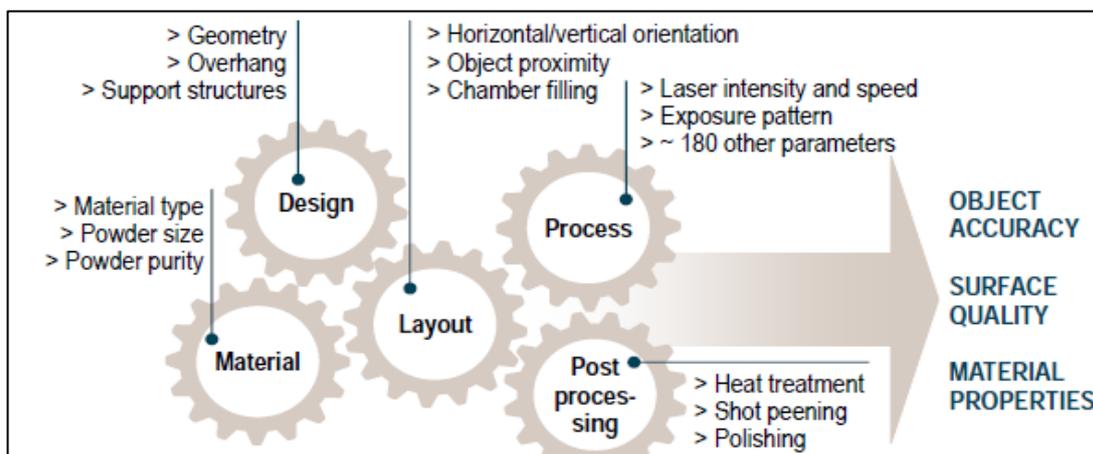
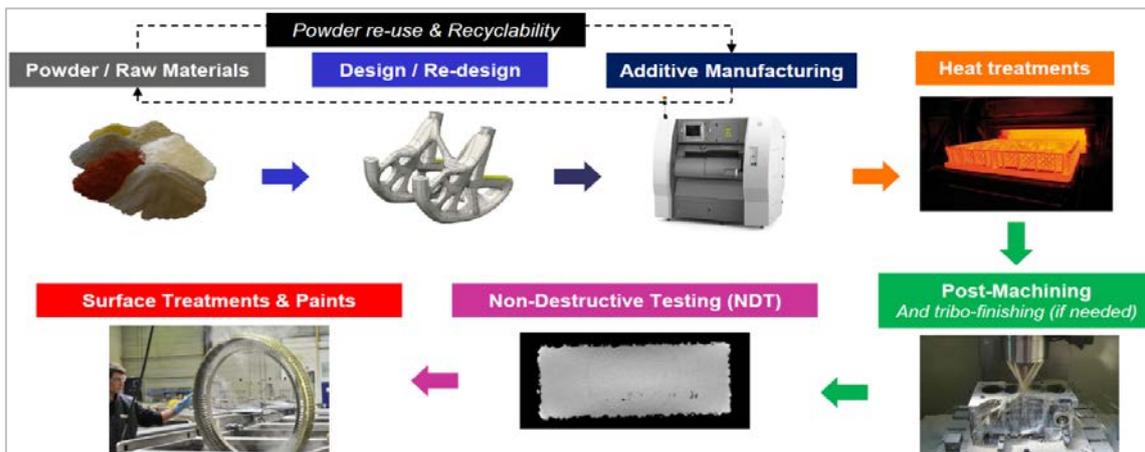


Figura 2-9. O processo completo da Manufatura Aditiva de peças metálicas e as várias etapas [8] [11].

## 2.2 Tecnologias de Powder Bed fusion

A Powder Bed Fusion (PBF) é a designação aceite pela ASTM para o processo de AM em que uma fonte de calor funde ou derrete seletivamente uma região numa cama de pó.

A Powder Bed Fusion, ou fusão em cama de pó, é a técnica mais frequentemente utilizada na impressão 3D de objetos metálicos. Os sistemas de PBF utilizam ou feixes de laser (mais frequente) ou feixes de elétrons (raramente) para derreter uma cama de pó. O Feixe de elétrons PBF permite taxas de construção mais elevadas, mas a qualidade da superfície e a escolha dos materiais são mais limitativas.

### Selective Laser Melting (SLM)

A Selective Laser Melting (SLM), ou Fusão Seletiva por Laser, é uma tecnologia de Manufatura Aditiva baseada em cama de pó, onde um produto é construído camada a camada, fundindo uma fina camada de partículas de pó metálico usando um laser de alta potência como fonte de energia térmica. Esta tecnologia permite a produção de peças complexas em 3D, com base num ficheiro CAD, com alta precisão ( $\pm 0.1$  mm em 25 mm) e alta qualidade de acabamento de superfície (5-15  $\mu$ m). Este fabrico por camadas otimiza a estrutura do design da peça SLM [12], [13]

Do ponto de vista do fabrico SLM, inicialmente uma camada de pó é aplicada na construção da plataforma com um novo re-coater (lâmina ou cilindro) e um feixe de laser funde seletivamente a camada de pó. Depois a plataforma é rebaixada entre os 20 e os 100  $\mu$ m (em função dos requisitos de fabrico da peça e do aspeto do acabamento desejado), e uma nova camada é aplicada. A operação de fusão com feixe a laser é repetida. Após alguns milhares de ciclos, dependendo da dimensão e altura da peça, a peça construída é removida da cama de pó. Uma representação esquemática do processo está incluída na Figura 2-10.

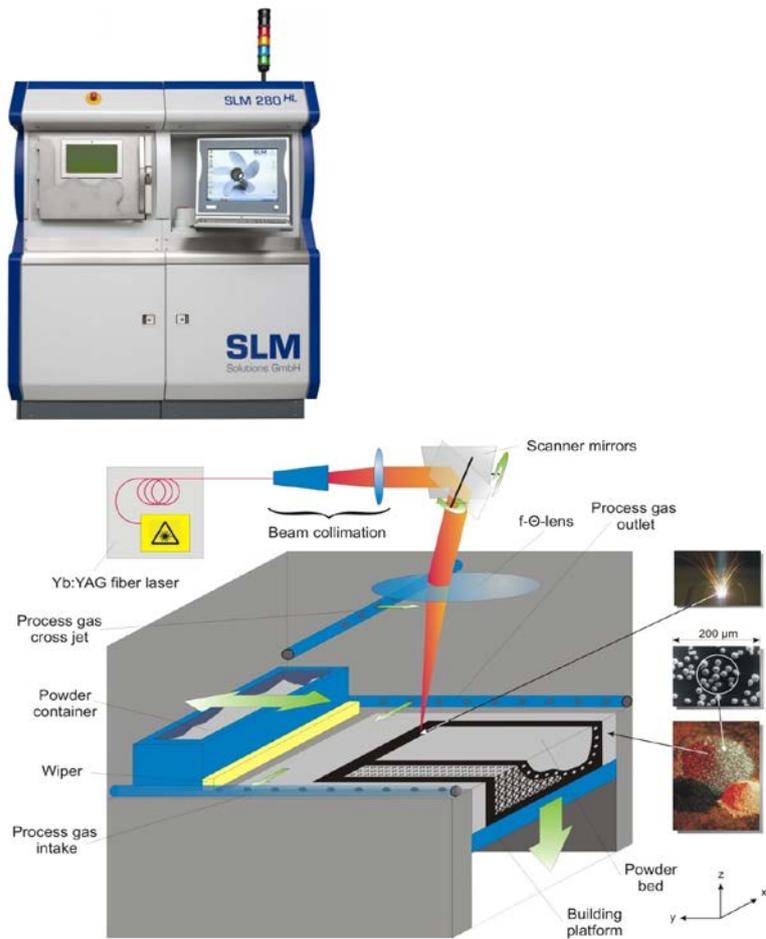


Figura 2-10. Representação esquemática do processo selective laser melting (SLM) [14].

Na SLM são possíveis diferentes estratégias de scanning. Os padrões de scanning do laser influenciarão o nível de porosidade, microestrutura e rugosidade da superfície. O padrão de linhas ou riscas em banda é definida pela largura do vetor do scanner, ou seja, a largura da banda, o espaço entre bandas, o espaço entre bandas adjacentes e a direção do scanner, bem como a sobreposição entre bandas próximas. Em cada camada, são possíveis várias configurações de laser scanning (ou padrões de riscas). Os parâmetros de scanning estão representados esquematicamente na Figura 2-11.

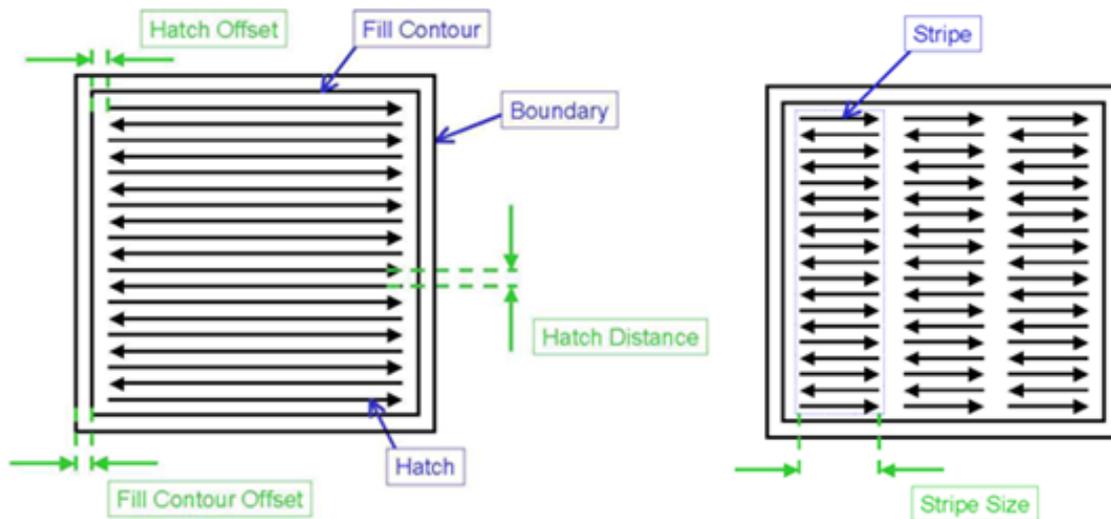


Figura 2-11. Parâmetros de scanning esquematicamente representados

Na Figura 2-12 está incluído um exemplo duma peça industrial fabricada através da tecnologia PBF – SLM no centro de investigação IK4-LORTEK.



Figura 2-12. Peça industrial fabricada pela tecnologia SLM pelo centro de investigação IK4-LORTEK.

Relativamente às vantagens e limitações, as características mais relevantes do processo SLM estão incluídas no Quadro 2-3.

Quadro 2-3. Vantagens e desvantagens da tecnologia SLM.

Vantagens da tecnologia SLM	Desvantagens da tecnologia SLM
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Peças funcionais e ferramentas com formatos complexos, únicos em metal ou pós cerâmicos.</li> <li>➤ Propriedades funcionais da superfície.</li> <li>➤ Estruturação da superfície incluindo a micro e a Nano estruturação.</li> <li>➤ Estruturas de baixo peso e composição em gradiente (potencialmente)</li> <li>➤ Peças Multimaterial (sob desenvolvimento).</li> <li>➤ Alta reciclabilidade da matéria prima em pó.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alta rugosidade da superfície.</li> <li>➤ Propriedades Anisotrópicas.</li> <li>➤ Aporte de calor altamente localizado: elevado stress residual.</li> <li>➤ Precisão de fabrico versus duração.</li> <li>➤ Ausência de controlo de qualidade on-line.</li> <li>➤ Dificuldades de evacuação do pó dos canais de pequenas dimensões.</li> <li>➤ Custo elevado das máquinas SLM.</li> </ul>

Relativamente à disponibilidade dos materiais, são vários os materiais processados pela indústria SLM. Um resumo está incluído no Quadro 4.

Quadro 2-4. Descrição dos materiais processados pela SLM.

Material	Propriedades	Setores Industriais	Ligas
<b>Aço Inoxidável</b>	Resistência à corrosão	Automóvel	1.4404
	Boas propriedades mecânicas	Construção Indústria Química Medicina Bens de consumo	1.4410
<b>Ferramenta em Aço</b>	Alta dureza	Produção de moldes de injeção	1.2344
	Elevada resistência ao desgaste	Implantes biomédicos	1.4542
	Dureza a quente	Para corte, prensagem, extrusão e cunhagem de metais e outros materiais	1.7228
	Boa maquinabilidade		1.4541 1.4313
<b>Co-Cr Ligas</b>	Alta dureza	Implantes biomédicos	CoCr (ASTM F75:Co212f)
	Resistência ao elevado desgaste	Odontologia	
	Boa resistência à corrosão	Aplicações a altas temperaturas	
	Propriedades mecânicas adequadas		
	Biocompatível		
<b>Super ligas baseadas em Níquel (Inconel)</b>	Elevada resistência à corrosão	Aeroespacial (motores de turbina)	Inconel 625
	Elevada resistência mecânica a alta temperatura	Geração de energia	Inconel 718
	Boa soldabilidade	Processamento petroquímico e químico	Inconel HX
	Resistência à corrosão		

<b>Ligas Ti</b>	Boas propriedades mecânicas Biocompatível Maquinabilidade adequada	Biomedicina Aeroespacial Off-shore Design e joalheria	Ti6Al4V TiAl6Nb7 Ti (Grade 1)
<b>Ligas Al</b>	Propriedades atrativas Ligas leves	mecânicas Automóvel Aeroespacial Bens de consumo	AlSi12 AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi9Cu3 AlMg4 5Mn0.4

Tendo em conta os fabricantes de máquinas SLM, existe uma vasta oferta de fabricantes de fusão a laser com metais em cama de pó, tais como: 3D Systems (USA), Concept Laser (Ge), EOS (Ge), Matsuura (Jp), Realizer (Ge), Renishaw (UK) ou SLM Solutions (Ge).

### Electron Beam Melting (EBM)

O processo Electron Beam Melting (EBM), ou Fusão por Feixe de Eletrões, representado esquematicamente na Figura 2-13, é análogo ao processo Selective Laser Melting (SLM), com a diferença que a fonte de energia é um feixe de eletrões em vez de laser.

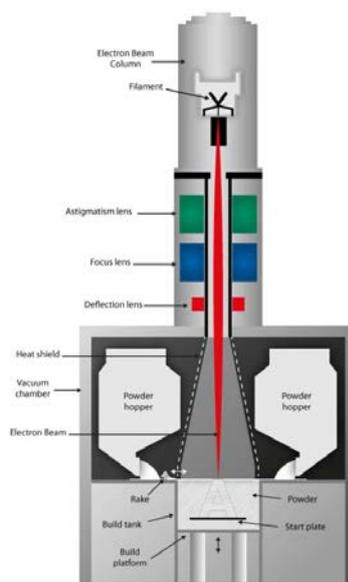


Figura 2-13. Representação esquemática do equipamento da Electron Beam Melting [15].

Durante o processo Electron Beam Melting process (EBM), os eletrões são emitidos por um filamento de tungstênio dentro da coluna e estão precisamente focados e defletidos através de bobines eletromagnéticas. Quando os eletrões de alta velocidade batem no pó de metal, a energia cinética é instantaneamente convertida em energia térmica aumentando a temperatura das partículas de pó acima do seu ponto de fusão. As peças EBM são construídas em vácuo para evitar uma perda de energia que seria causada pela circulação a alta velocidade dos eletrões a colidir com moléculas de ar ou de gás. O vácuo tem duas vantagens: o processo é 95% mais eficiente em termos energéticos, que é cinco a dez vezes superior à tecnologia a laser, e o vácuo suporta o processamento de ligas metálicas reativas, tais como o TI ou Al, ou seja, mantém a composição química do material e oferece um excelente ambiente na construção das peças. Uma das

características interessantes deste método de fabrico reside na manutenção das condições ao longo do processo. Por exemplo, quando se fabricam peças de titânio, que normalmente apresentam um stress residual alto, a cama de pó é pré-aquecida até aos 600-700°C por forma a obter um menor gradiente térmico durante a solidificação, evitando altos stresses [13], [16], [17].

Quando a Electron Beam Melting (EBM) é comparada com outros processos de Powder Bed, tais como a SLM (ver Quadro 2-5), a EBM mostra taxas de produção mais elevadas (até 60 cm<sup>3</sup>/h) em resultado da elevada eficiência energética do feixe de eletrões. Igualmente, são necessárias menos estruturas de suporte na construção da peça. Outra limitação dos sistemas de cama de pó é a dimensão dos componentes fabricados, limitada ao tamanho da cama, o que restringe a sua aplicação a componentes de dimensão relativamente pequena, tipicamente inferior a 400x400x400 mm em comprimento, largura e altura. Por outro lado, as peças EBM são caracterizadas por um acabamento de superfície muito pobre (principalmente relacionado com uma espessura de camadas mais grossa aplicada durante o processo de fabrico) com desvios geométricos mais elevados, com um número limitado de materiais disponíveis, comparado com os processos de laser baseados nos processos PBF (apenas o Titânio Ti6Al4V, Titânio Ti6Al4V ELI, Titânio Grade 2 e o Cromo-Cobalto ASTM F75 podem ser encontrados de forma acessível para o EBM).

Quadro 2-5. Comparação entre os processos EBM e SLM.

Characteristic	Electron beam melting	Selective laser melting
Thermal source	Electron beam	Laser
Atmosphere	Vacuum	Inert gas
Scanning	Deflection coils	Galvanometers
Energy absorption	Conductivity-limited	Absorptivity-limited
Powder pre-heating	Use electron beam	Use infrared 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

Vale ainda a pena referir que a EBM tem sido particularmente eficaz na indústria médica para criação de implantes.

No Quadro 2-6 está incluída uma descrição das propriedades dos diferentes materiais metálicos disponíveis para o processamento SLM e EBM. Existe uma vasta gama de matérias-primas potencialmente interessantes para a indústria aeroespacial.

Quadro 2-6. Descrição das propriedades físicas e mecânicas dos materiais metálicos disponíveis para diferentes processos AM: PBF- baseado em laser e PB- baseado em feixe de eletrões e diferentes empresas.

Nome Comercial	Tecno AM	Empresa	Densid. [g/cm <sup>3</sup> ]	Tensão de Tração [MPa]		de HV	Exp. Térmica [K <sup>-1</sup> ] x 10 <sup>-6</sup>		Conduct. Térmica [W/m·K]
				Min	Max		Min	Max	
Titânio Puro	SLM	Soluções SLM	4.5	290	n/a	200 HV	n/a	n/a	22.6
		RENISHAW	4.5	290	-	n/a	n/a	n/a	22.6
Titânio	SLM	Soluções SLM	4.43	972	n/a	366	n/a	n/a	7.1

Nome Comercial	Tecno AM	Empresa	Densid. [g/cm <sup>3</sup> ]	Tensão de Tração [MPa]		de HV	Exp. Térmica [K <sup>-1</sup> ] x 10 <sup>-6</sup>		Condut. Térmica [W/m·K]								
				Min	Max		Min	Max									
Ti6Al4V																	
										EOS	4.41	1180	1280	320 HV	n/a	n/a	n/a
										RENISHAW	4.43	1061	1121	366 HV	n/a	n/a	7.1
										ARCAM	4.43	1020	1020	327 HV	n/a	n/a	n/a
Titânio Ti6Al7Nb	SLM																
										Soluções SLM	4.52	1020	n/a	386 HV	n/a	n/a	7
Titânio Ti6Al4V (Extra Interstitials)	ELI Low	EBM	ARCAM	4.43	970	970	318 HV	n/a	n/a	n/a							
Titânio Grade 2		EBM	ARCAM	4.5	570	570	n/a	n/a	n/a	n/a							
Aço 1.4404(316L)																	
										Soluções SLM	8	595	655	237 HV	n/a	n/a	15
Aço 1.2344 (H13)																	
										Soluções SLM	7.8	1700	1760	578 HV	n/a	n/a	25.6
Aço 1.2709		SLM	Soluções SLM	8	1080	1140	528 HV	n/a	n/a	15							
Aço 1.4410		SLM	RENISHAW	8	730	770	237 HV	n/a	n/a	15							
Aço Inoxid. GP1		SLM	EOS	7.8	800	900	230 HV	14	14	13							
Alumínio AlSi12																	
										Soluções SLM	2.7	389	429	n/a	n/a	n/a	n/a
Alumínio AlSi10Mg		SLM	EOS	2.67	410	465	126 HV	n/a	n/a	103							
Cobalto-Crômio CoCr F75																	
										Soluções SLM	8.25	1030	1070	346 HV	n/a	n/a	12.5
										RENISHAW	8.25	1030	1070	346 HV	n/a	n/a	12.5
		EBM	ARCAM	8.25	960	960	471 HV	n/a	n/a	n/a							
Cobalto-Crômio MP1		SLM	EOS	8.3	1250	1450	392 HV	13.6	15.1	13							
Inconel HX(2.4665)																	
										Soluções SLM	8.22	910	910	95 HV	n/a	n/a	11.6
										Soluções SLM	8.44	680	680	n/a	n/a	n/a	11.4
Inconel 625																	
										RENISHAW	8.44	680	680	n/a	n/a	n/a	11.4
Inconel 718		SLM	Soluções SLM	8.19	1200	1200	n/a	n/a	n/a	11.5							

Nome Comercial	Tecno AM	Empresa	Densid. [g/cm <sup>3</sup> ]	Tensão de Tração [MPa]		de HV	Exp. Térmica [K <sup>-1</sup> ] x 10 <sup>-6</sup>		Condut. Térmica [W/m·K]
				Min	Max		Min	Max	
		RENISHAW	8.19	1200	1200	n/a	n/a	n/a	11.5
		EOS	8.15	1010	1110	310 HV	12.5	17.2	n/a

### 2.3 Directed Energy Deposition para a AM Metálica

A deposição de Energia Direta (DED) para a AM metálica (MAM) está menos divulgada do que outras tecnologias AM, devido à baixa precisão e à necessidade de pós-processamento.

Uma máquina típica de DED consiste num injetor montado num braço axial, que deposita material fundido sobre a superfície especificada, onde solidifica. Então, a DED utiliza energia concentrada para fundir materiais por fusão enquanto o material está a ser depositado. O princípio é similar à extrusão de material, mas o injetor consegue mover-se em múltiplas direções e não está fixo a um eixo específico. Os Processos DED utilizam material por fio ou sob a forma de pó. Por fio é menos exato devido à sua natureza pré-formada, mas é mais eficiente quando comparado com o pó, pois apenas o material necessário é utilizado. O método de fusão de material pode ser por feixe laser, por elétrons ou por arco elétrico (processos de arco de plasma, gás inerte de tungsténio ou gás inerte de metal).

A maior parte dos sistemas utilizam um sistema de motor de 4- ou 5- eixos ou um braço robótico para posicionar a cabeça da deposição, para que o processo não esteja limitado a camadas sucessivas horizontais. Enquanto que na maior parte dos casos, é o braço que se move e o objeto permanece numa posição fixa, isto pode ser invertido e a plataforma podia ser movida em alternativa, e o braço permaneceria numa posição fixa. A escolha dependerá da aplicação exata e do objeto a ser impresso. Contudo, é conseguida uma menor liberdade no design se comparada com os processos de PBF. Também são necessários tratamentos a quente de pós-deposição e maquinação final, de forma a alcançarem-se as propriedades mecânicas corretas e a tolerância geométrica.

As aplicações típicas incluem reparação e manutenção das peças estruturais. Os Processos DED são usados primariamente para adicionar funcionalidades à estrutura existente ou para reparar peças danificadas ou usadas.

#### Direct manufacturing (EBAM™ ou Electron Beam Freeform Fabrication (EBF<sup>3</sup>))

A SCIAKY, localizada em Chicago, Illinois, é um importante fornecedor de sistemas de fabrico baseados em tecnologia de soldadura Electron Beam [18]. A Manufatura Aditiva por feixe de elétrons (EBAM™) da SCIAKY é uma tecnologia de impressão AM a 3D com muitos benefícios, sendo as peças feitas mais depressa, com menos material, tempo

reduzido de maquinação e menor tempo de comercialização. Adicionalmente, o processo EBAM™ prima pela produção de alta qualidade, estruturas de metal de grande escala feitas de elementos metálicos de grande valor acrescentado; as ligas de titânio, tântalo e à base de níquel são aplicadas na produção de peças, numa questão de dias, com muito pouco desperdício de material. O processo EBAM™ também pode ser utilizado em qualquer fase do ciclo de vida do produto: desde protótipos rápidos e peças de produção à reparação e remanufactura das aplicações.

Partindo de um modelo 3D-CAD, o feixe de eletrões derrete o fio metálico da matéria-prima e deposita o metal, camada a camada, deixando a peça próxima da forma final e pronta para a fase de acabamento (tratamento a quente e maquinação). Este processo mostra altas taxas de deposição, entre 3 a 9 Kg de metal por hora, dependendo do material seleccionado e das características da peça. Uma representação esquemática do processo EBAM™ está incluída na Figura 2-14.

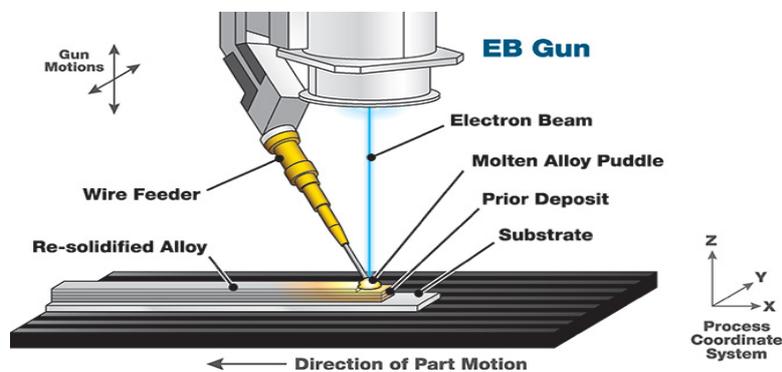


Figura 2-14. Vista esquemática do processo EBAM™ [18].

## Laser Metal Deposition (LMD)

No processo de Laser Metal Deposition (LMD) – Deposição Metálica por Laser um injetor montado num braço multi-eixo deposita o material fundido sobre a superfície onde vai solidificar. Os sistemas alimentados a pó sopram pó através do injetor, que é fundido por um feixe de laser na superfície da peça. Este processo é baseado na deposição automática duma camada de material com uma espessura a variar entre os 0.1 mm e alguns milímetros. A consolidação metalúrgica do material de revestimento com o material de base e a ausência de “undercoating” são algumas das características deste processo. Uma vista esquemática do processo LMD está incluída na Figura 2-15.

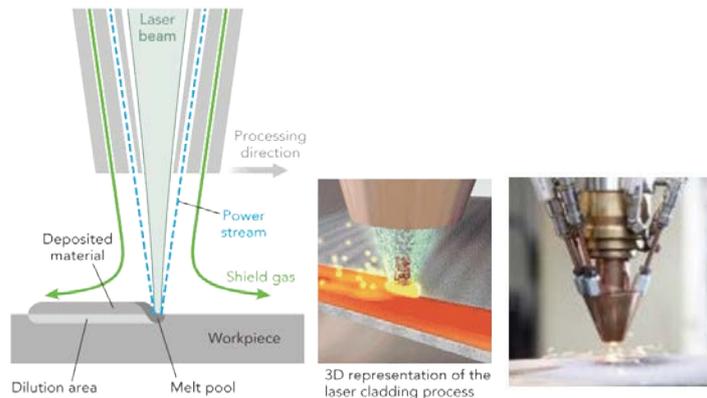


Figura 2-15. Vista esquemática do processo Laser Metal Deposition.

Por outro lado, os sistemas a laser baseados em alimentação por fio, como Laser Metal Deposition-wire (LMD-w), o fio é conduzido através dum bocal e é fundido por um laser, com gás inerte de proteção em ambiente aberto (laser envolvido por gás) ou num recinto ou câmara de gás de selada. Este processo oferece taxas de deposição mais elevadas em comparação com a cama de pó e o pó soprado DED.

Geralmente, a tecnologia LMD oferece uma maior produtividade do que a SLM e também a capacidade de produzir peças maiores, mas a liberdade do design é muito mais limitada, por exemplo, as estruturas reticulares que combinam um arco elétrico e os canais internos não são possíveis de fabricar. Um resumo das vantagens e limitações do processo LMD está incluído no Quadro 2-7.

Quadro 2-7. Vantagens e desvantagens da tecnologia Laser Metal Deposition.

Vantagens da tecnologia LMD	Desvantagens da tecnologia LMD
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Boa aderência entre o substrato e o material depositado: ligação metalúrgica.</li> <li>➤ Grande variedade de ligas.</li> <li>➤ Baixo nível de diluição.</li> <li>➤ Taxas de deposição relativamente altas.</li> <li>➤ Alta reprodutibilidade do processo.</li> <li>➤ Baixo impacto nas propriedades do substrato.</li> <li>➤ Grande flexibilidade na dimensão das peças (altura quase ilimitada).</li> <li>➤ Pode ser usado como revestimento do laser para melhorar as propriedades da superfície.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Equipamento de custo elevado.</li> <li>➤ Material em pó de custo elevado.</li> <li>➤ Liberdade de design limitada comparando com os processos de cama de pó.</li> <li>➤ São necessárias etapas de pós processamento para obter boa retilinidade da superfície.</li> </ul>

## Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)

As tecnologias Wire & Arc Additive Manufacturing (WAAM) – Manufatura Aditiva por Fio e Arco que combinam um arco elétrico como fonte de calor e matéria-prima na forma de fio metálico, têm sido pesquisadas para efeitos de AM desde os anos 90, embora a

primeira patente tenha sido registada em 1925. A WAAM utiliza equipamento de soldadura: fonte de alimentação da soldadura, maçaricos e sistemas de alimentação por fio. O movimento pode ser feito através de sistemas robóticos ou pórticos de controlo computadorizado. Sempre que possível, o gás inerte metálico (MIG) é a escolha de eleição: o fio é o eléctrodo consumível e a sua co-axialidade com o maçarico de soldar facilita o percurso da ferramenta. Para além da transferência de metal frio (CMT), a variante modificada GMAW, baseada num mecanismo de controlo em profundidade em modo de transferência por imersão, também tem sido largamente implementada nos processos AM devido à sua elevada taxa de deposição com baixo aporte de calor. Noutros casos, o gás inerte de tungsténio (TIG) ou a soldagem a arco ou a plasma são outros dos processos aplicados. Um diagrama esquemático dos processos GMAW, GTAW e PAW são mostrados na Figura 2-16 [57].

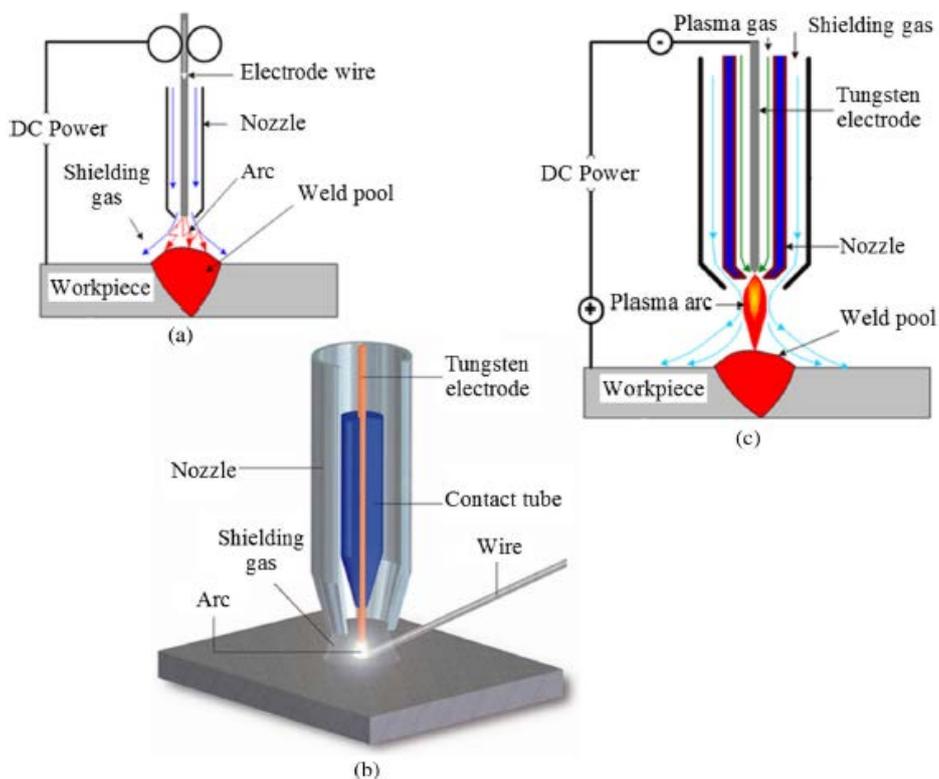


Figura 2-16. Diagrama esquemático dos processos a) GMAW, b) GTAW e c) PAW [57].

Altas taxas de deposição, custos baixos de material e de equipamento e boa integridade da estrutura fazem da Manufatura Aditiva Wire & Arc uma adequada candidata para substituir o atual método de fabrico desde lingotes sólidos ou grandes forjas, em especial, no que respeita às peças de baixa e média complexidade. Uma grande quantidade de materiais está disponível para este método de AM incluindo as ligas de aço, níquel e ligas de titânio. A tecnologia WAAM é particularmente promissora no fabrico de grandes peças (ver Figura2-17), com um baixo nível de custo do capital comparado com outros processos de AM [58].

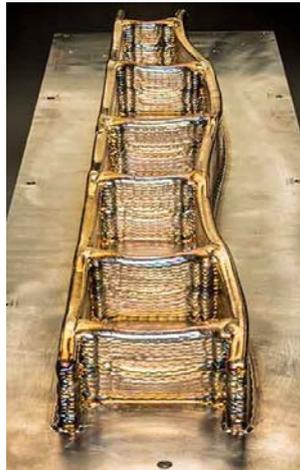


Figura 2-17. Peça de Titânio (BAE systems spar) manufaturada por processos WAAM [58], [59].

As principais vantagens e inconvenientes da tecnologia WAAM estão listadas no Quadro 2-8.

Quadro 2-8. Vantagens e Inconvenientes dos processos WAAM.

Vantagens da tecnologia WAAM	Desvantagens da tecnologia WAAM
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Custos de material mais baixos do que em outras tecnologias AM.</li> <li>➤ Custo de utilização do material. A soldadura por fio metálico é mais barata do que por pó.</li> <li>➤ Arquitetura aberta. O utilizador final pode combinar qualquer marca de fonte de alimentação e manipulador. Controlo total sobre o hardware. O Software pode ser adaptado ao equipamento específico disponível.</li> <li>➤ Dimensão da peça. A dimensão máxima da peça é determinada unicamente pela capacidade de alcance do manipulador ou pelo tamanho do envelope interno da câmara, no caso de materiais reativos.</li> <li>➤ Altas taxas de deposição, variando entre 1 kg/h e 4kg/h para Al e Aço. Valores de 10 kg/h podem ser alcançados.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Os stresses residuais e distorções são uma preocupação grande para a WAAM em grande escala. As tolerâncias das peças podem ser afetadas. A falha prematura também tem sido um problema.</li> <li>➤ Precisão. A forma de corte afeta a precisão. Efeitos <i>Un-match</i> e <i>stair-case</i> têm sido reportados. A precisão é 10 vezes menor do que na tecnologia da cama de pó.</li> <li>➤ Acabamento da superfície. A rugosidade da superfície está relacionada com a geometria do cordão de solda.</li> </ul>

Contudo, tem inconvenientes para produção de pequenos componentes de geometria complexa, uma vez que os impulsos das altas temperaturas causam distorções consideráveis, e também stresses residuais. As distorções conduzem a tolerâncias pobres enquanto que os stresses residuais afetam o comportamento mecânico do componente. Igualmente, as operações de pós-processamento são necessárias devido ao deficiente acabamento da superfície obtido com WAAM.

## 2.4 Comparação entre as tecnologias Powder Bed Fusion e Directed Energy Deposition

A Laser Powder Bed Fusion é a tecnologia dominante para AM metálica (MAM) devido à grande precisão, elevada qualidade da superfície e liberdade de design. A espessura típica da camada na tecnologia PBF é de 20–100  $\mu\text{m}$ , e os componentes completos podem atingir uma precisão dimensional de  $\pm 0.05$  mm e uma rugosidade de superfície de 9–16  $\mu\text{m}$ . Igualmente, é possível produzir peças com materiais funcionalmente gradativos (FGM). Contudo, a taxa de deposição da tecnologia FGM, tipicamente à volta dos 10 g/min, limita a sua aplicação no fabrico de componentes de média e grande dimensão.

Na wire-feed AM, um fio metálico é utilizado como material de abastecimento em vez do pó de metal. Há três fontes de energia diferentes utilizadas na deposição de metal: AM laser-based, arc welding-based e electron beam-based wire-feed. A Wire-feed AM tem uma eficiência de utilização do material mais elevada até 100% do material de fio depositado no componente. Por isso, é um processo muito mais amigo do ambiente. Também os fios de metal têm um custo mais baixo e estão disponíveis mais rapidamente do que os pós de metal tendo propriedades adequadas para a AM. Os processos DED baseados em “wire as feedstock”, comparados com os processos de “powder-feed”, têm uma taxa de deposição muito mais alta. Mas vale a pena mencionar que existe uma compensação entre uma taxa de deposição alta e uma resolução alta quando se seleciona o tipo de processo AM a utilizar em determinado componente.

Uma comparação entre os processos de fusão powder bed e directed energy deposition está incluída no Quadro 2-9.

Quadro 2-9. Comparação dos processos AM: laser powder bed fusion vs. directed energy deposition [2], [22], [23]

	PBF - SLM	DED LMD	DED - WAAM	DED - EBF3
<b>MATERIAIS</b>	Limitada e baixa experiência em comparação com a DED	Grande diversidade de materiais		Elementos Metálicos de grande valor acrescentado
<b>DIMENSÃO DA PEÇA</b>	Limitada pelo processo da câmara, 500x280x325 mm	Limitada pelo sistema de manuseamento, 2000x1500x750 mm		
<b>COMPLEXIDADE DA PEÇA</b>	Quase ilimitada	Limitada		
<b>PRECISÃO DIMENSIONAL</b>	$\pm 0.04$ mm	$\geq 0.1$ mm	$\pm 0.2$ mm	Baixa
<b>VELOCIDADE CONSTRUÇÃO</b>	1-3 mm <sup>3</sup> /s	3-10 mm <sup>3</sup> /s	1-4 kg/h	3-9 kg/h

<b>QUALIDADE SUPERFÍCIE (RUGOSIDADE, Rz)</b>	5 - 15 µm	30 - 200 µm	200 µm	Alta
<b>ÁREA CONCENTRAÇÃO</b>	-Prototipagem rápida -Manufatura direta das peças	-Reparação das peças gastas -Modificação da instrumentação para reutilização - Manufatura direta das peças		

## 2.5 Maturidade das tecnologias AM

### Tecnologias Powder Bed Fusion

As tecnologias analisadas em termos de maturidade da powder bed fusion são: SLM e EBM.

*Quadro 2-10. Maturidade da SLM*

<b>Selective Laser Melting (SLM)</b>
<b>Idade da tecnologia:</b>
18 anos
<b>Da mais velha à mais nova</b>
Fockele & Schwarze
<b>Ano de irrupção no mercado:</b>
1999
<b>Número de fornecedores:</b>
19
<b>Utilização mais alargada</b>
O setor médico e instrumentação são os setores onde a SLM está mais difundida. No setor aeroespacial os injetores de combustível, elementos estruturais e pás são as aplicações mais comuns.
<b>Mais informação relevante</b>
As primeiras utilizações foram na prototipagem do plástico. A maturidade da manufatura SLM depende dos materiais e da aplicação. No caso da SLM para o setor aeroespacial a TRL (technology readiness level) situa-se no intervalo 5-7 como pode ser observado na Figura 1. Isto depende muito do material e da aplicação.

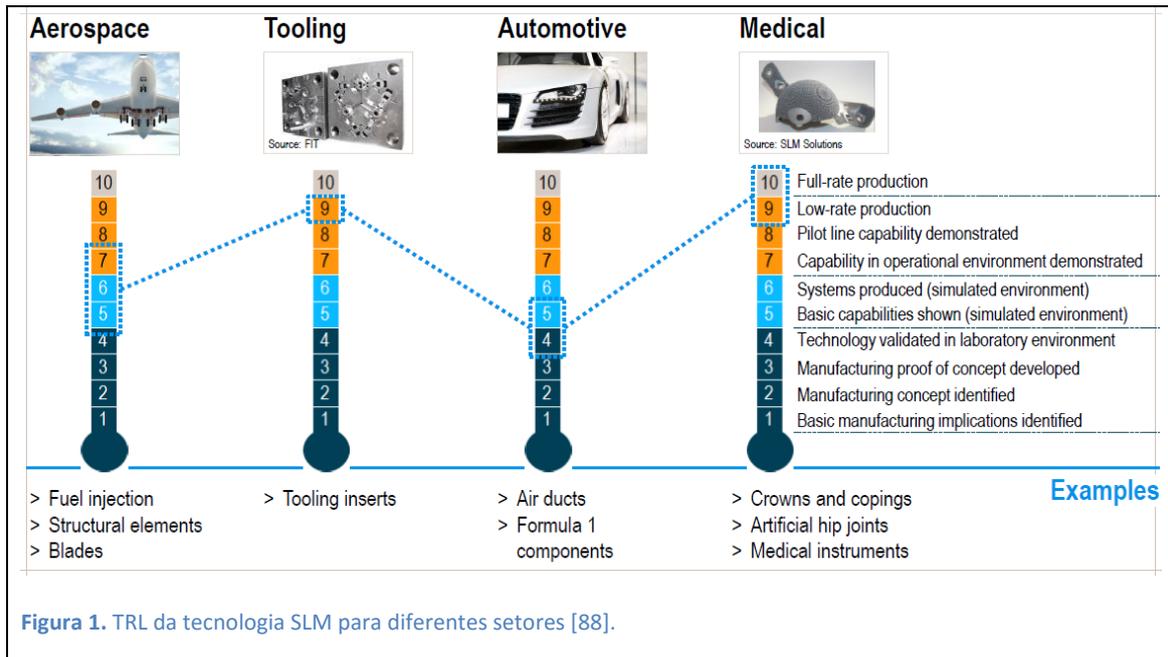


Figura 1. TRL da tecnologia SLM para diferentes setores [88].

Quadro 2-11. Maturidade da EBM

<b>Electron Beam Melting (EBM)</b>	
<b>Idade da tecnologia:</b>	19 anos
<b>Da mais velha à mais nova</b>	ARCAM "EBM S12" e as novas são a Arcam Q10 e a Q20
<b>Ano de irrupção no mercado:</b>	1998
<b>Número de fornecedores</b>	1
<b>Utilização mais alargada</b>	Pás de turbina para motores de aeronaves e implantes.
<b>Mais informação relevante</b>	A situação para a utilização espacial da AM é, no caso da EBM para o titânio é no TRL 9. Tal com no caso da maturidade da SLM, a maturidade da EBM depende do material e aplicações.

## Tecnologias Directed Energy Deposition

As tecnologias analisadas em termos da maturidade da powder bed fusion são: LMD, EBAM® e WAAM.

*Quadro 2-12. Maturidade da LMD*

<b>Laser Metal Deposition (LMD)</b>
<b>Idade da tecnologia:</b>
19 anos
<b>Da mais velha à mais nova</b>
Optomec LENS
<b>Ano de irrupção no mercado:</b>
1998
<b>Número de fornecedores</b>
8
<b>Tecnologia mais popular</b>
Blown powder e wire
<b>Utilização mais alargada</b>
Começou com as aplicações de revestimento e reparação.
<b>Mais informação relevante</b>

*Quadro 2-13. Maturidade da EBAM*

<b>Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM®)</b>
<b>Idade da tecnologia:</b>
8 anos
<b>Da mais velha à mais nova</b>
Sciaky's EBAM
<b>Ano de irrupção no mercado:</b>
2009

<b>Número de fornecedores</b>
1
<b>Utilização mais alargada</b>
Componentes estruturais em Titânio para aeronaves.
<b>Mais informação relevante</b>
Excelente escolha para ligas refratárias e materiais dissimilares

*Quadro 2-14. Maturidade da WAAM*

<b>Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)</b>
<b>Idade da tecnologia:</b>
<p>Esta manufatura utiliza diferentes tecnologias de arc welding: GTAW (gas tungsten arc welding), GMAW (gas metal arc welding) e PAW (Plasma arc welding). Estas tecnologias têm sido amplamente desenvolvidas para processos conjuntos. A utilização destas tecnologias na manufatura aditiva foi patenteada nos anos 1920 por Baker, produzindo peças metálicas em 3D através da sobreposição de cordões de solda usando arc welding. Maior precisão e automação das peças podiam ser desenvolvidas com a introdução de braços robóticos.</p> <p>Nos anos 1990 a tecnologia WAAM foi impulsionada pelo Welding Engineering Research Centre da Cranfield University.</p>
<b>Da mais velha à mais nova</b>
1940 métodos TIG, 1950 métodos MIG.
<b>Ano de irrupção no mercado:</b>
Esta tecnologia para os processos de soldadura está no mercado há muito tempo. A inovação neste campo veio do desenvolvimento das tecnologias em termos de estabilidade do arco para diferentes materiais e taxas de deposição. A pesquisa e inovação em diferentes locais (universidades, centros tecnológicos em estreita colaboração com grandes fabricantes) está a ser desenvolvida, mas ainda não está implementada industrialmente.
<b>Número de fornecedores</b>
Período de desenvolvimento das máquinas industriais.
<b>Tecnologia mais popular</b>
GTAW, GMAW e PAW
<b>Utilização mais alargada</b>

O objetivo destas tecnologias de manufatura aditiva é construir peças grandes com uma alta taxa de deposição e rácios baixos de buy to fly que permitam a utilização de materiais com um custo alto e com complexidade baixa a média.

#### **Mais informação relevante**

A Norsk Titanium começou a fabricar peças de metal por PAW para a Boeing para obter certificações.

## 2.6 Simulação numérica na manufatura aditiva

A manufatura aditiva (AM) está atualmente a revolucionar a forma de fabricar itens graças a quatro vantagens principais [70]:

- A AM oferece mais liberdade na forma de conceção dos itens comparada com os processos clássicos (casting - fundição, etc.);
- A AM é amiga do ambiente porque usa apenas o material necessário para construir a peça (parcialmente verdade porque uma parte do pó é sempre desperdiçada);
- As máquinas AM são adaptáveis: elas conseguem produzir qualquer item (não são dedicadas a um único tipo de manufatura/ item). Apenas as dimensões do item podem ser restritivas.
- O item pode ser personalizado, encaixando perfeitamente nas necessidades do utilizador.

Apesar de todas as suas vantagens, a manufatura aditiva atravessa alguns problemas como a capacidade de abordagem desconhecida dos processos AM. Isto gera problemas como a geometria prevista (em teoria) e aquela que foi realmente produzida [1]. Para resolver o problema, é necessário levar a cabo algumas operações de acabamento adicionais ou modificar sucessivamente o design para produzir a geometria prevista. De qualquer forma, isto implica despesas adicionais aos custos de produção.

A diferença entre os 2 designs é principalmente devida a [71]:

- Falta de conhecimento acerca dos fenómenos físicos que ocorrem durante o processo de manufatura. Nesse caso estes fenómenos não estão totalmente dominados durante o processo e é muito difícil prever a qualidade final do produto;
- Os fenómenos físicos implícitos assentam no processo de manufatura e no plano do processo utilizados. Todos os parâmetros devem ser integrados no processo do design o mais cedo possível.

Para a LMD-P, os principais parâmetros que determinam o processo de manufatura são o material, o pó do laser, o fluxo do pó, o jato do gás e a velocidade de soldadura [72].

A orientação do item durante a manufatura e a estratégia de scan escolhida também influenciam as características finais do produto. Considerando o processo da “powder bed” e usando os mesmos parâmetros de manufatura, Bo [73] compara dois tipos de estratégias de scan, scans “sweep” e “spiral”, para manufaturar a peça duma turbina. A comparação dos dois scans é inquestionável: a peça não pode ser manufaturada usando um scan “sweep”! Por causa das elevadas temperaturas, a peça colapsou durante o

fabrico. A diferença de intensidade e localização das restrições térmicas induzidas por cada estratégia de scan também depende do processo de manufatura. Foroozmehr [74] chegou à mesma conclusão acerca da influência da estratégia de scan ao estudar o processo de projeção de pó.

Finalmente, a manufatura aditiva tem impacto sobre alguns parâmetros do item produzido: como sejam o acabamento da superfície (rugosidade, curvatura nada suave, mas com uma forma de “degrau”, etc.), a resistência às limitações termomecânicas e as tensões inerentes (Bikas [75]) para modelar o processo de manufatura. Mas os resultados numéricos apenas são exploráveis se o modelo numérico estiver suficientemente perto do comportamento real.

Na manufatura aditiva, são muitos os parâmetros influenciadores do processo: eles caracterizaram o processo de fabrico (tais como a velocidade do laser, o fluxo do pó, a potência do laser...), o item final produzido (tensões residuais...) e a posição da peça durante a soldadura. Mesmo tendo sido investigado nos últimos anos, não há nenhum método ou ferramenta que permita a simulação da manufatura duma peça complexa num prazo razoável. Por “complexa”, está implícito que a peça não é um cordão de solda reto (com uma ou várias camadas retas). Esta falta de ferramentas numéricas deve-se à imaturidade destes processos e também ao conhecimento parcial do fenómeno multi-físico envolvido. Além disso, a complexidade destes fenómenos torna a instituição e a solução numérica destes modelos mais complicada, elevando o tempo necessário para a resolução das equações (Kumar [76]).

## Modelação com elementos finitos

Nos últimos dez anos, muitos estudos foram publicados, relacionados com a modelação direta de fenómenos físicos implícitos na manufatura aditiva. Estes fenómenos estão associados e interagem em conjunto. Na powder projection, a geometria final das peças depende principalmente de dois fatores:

- A evolução da geometria local da soldadura durante o processo de manufatura;
- As deslocações e as tensões inerentes induzidas pela manufatura.

A evolução da geometria local da soldadura assenta diretamente nas dimensões do tanque de fusão criada pelo laser no substrato. Também é influenciada pelo fluxo do pó em termos da quantidade e repartição. Relativamente às tensões residuais e às deslocações, elas dependem do gradiente de temperatura e das propriedades termomecânicas dos materiais usados.

Assim, Toyserkani [77] desenvolveu um modelo 3D para estudar o impacto dos principais parâmetros do processo nas características da zona de fusão. Cho [78] completou o modelo adicionando o impacto da temperatura latente num domínio semi-infinito. A comparação dos resultados numéricos e experimentais mostra uma grande correspondência entre eles numa camada de cordão de solda.

Relativamente às deslocações e tensões inerentes resultantes dos campos de temperatura, alguns estudos foram já efetuados. Ghosh [79] desenvolveu um modelo

incluindo a fase de mudança do material de forma a determinar as tensões inerentes na manufatura duma camada de cordão de solda. Foroozmehr [74] considerou o fornecimento contínuo de material, ativando aos poucos os elementos da malha da peça. Todas as tensões residuais estão, desta forma, a modelar uma camada inteira dum cordão de solda.

Na maioria dos estudos sobre manufatura aditiva, a deformação da peça é calculada através da seguinte equação:

$$\epsilon_{i,j} = \epsilon_{i,j}^M + \epsilon_{i,j}^P + \epsilon_{i,j}^T \quad (1)$$

Com  $\epsilon_{i,j}^M$ ,  $\epsilon_{i,j}^P$  et  $\epsilon_{i,j}^T$  as deformações respetivas causadas pelo stress mecânico, a plasticidade do material e a variação da temperatura. A relação stress/deformação é geralmente considerada linear:

$$\sigma_p = D_{p,q,i,j} \cdot \epsilon_{i,j} \quad (2)$$

com  $\sigma_p$ , o stress elástico e  $D_{p,q,i,j}$  a rigidez tensora do material utilizado.

Os estudos centrados na ligação entre os stresses e as deformações da peça, geralmente integram resultados experimentais que validam o modelo térmico, mas a maioria deles são conduzidos em geometrias simples como os cordões de solda retos com uma ou mais camadas.

Para definir a geometria local da soldadura, existem várias abordagens. No estudo de Morville [80], um modelo 2D determina a geometria local da soldadura que deforma a malha inicial de acordo com as forças capilares e Termo capilares induzidas pelo campo da temperatura (o efeito de “Marangoni”). Outros como Toyserkani [77] também modelaram a soldadura, mas em 3D. Para o fazerem, eles definem os limites do tanque de fusão para o tempo de cada etapa e modelam o abastecimento de material nesta zona com a seguinte equação:

$$\delta h(x,y) = \delta t \cdot \dot{m}_p / \rho \cdot Spowder \quad (3)$$

Com  $\delta t$  tempo da etapa de simulação,  $\dot{m}_p$  a taxa do fluxo do caudal mássico,  $\rho$  a densidade do pó e  $Spowder$  a superfície da projeção do pó sobre a peça.

Este modelo foi reutilizado em alguns estudos que sublinharam a sua validade para uma camada de cordão de solda, mas também para várias camadas de cordões de pó (Alimardani [81], Fallah [82]). Contudo, a simulação de peças complexas é ocasional porque necessita de muito tempo para resolver os modelos. Atualmente, para simular um cordão de solda reto com o comprimento de algumas dezenas de milímetros, o tempo necessário varia entre alguma horas e alguns dias, dependendo do computador e dos modelos utilizados.

## Software geralmente utilizado

Existem várias formas de modelar a manufatura aditiva numa peça usando software de simulação diferentes. Podem encontrar-se na literatura alguns como:

- Toyserkani [77] que determinou as equações analíticas dos diferentes fenómenos envolvidos. Depois ele usou o MATLAB e FEMLAB para os resolver. Uma malha tetraedra foi usada com um ajuste, a cada etapa.
- Cho [78] usou o software ABAQUS. Ele focou-se no calor latente e no seu efeito sobre a manufatura aditiva. Ele desenvolveu um modelo completo de manufatura aditiva.
- Como Foroozmehr [74], Fallah [83] usou Ansys APDL para resolver o modelo numérico. O princípio “aditivo” da manufatura está representado graças à adição/ remoção dos elementos da malha. Os comportamentos termomecânicos também são tidos em conta.
- Alimardani [81] usou COMSOL Multiphysics 3.2a para desenvolver os seus próprios modelos numéricos graças à possibilidade de os combinar com os códigos MATLAB.

O software corrente das simulações mecânicas não foi desenvolvido para as simulações de manufatura aditiva (Ansys, Abaqus, Matlab, CodeAser), o que as torna menos interessantes. Algum software novo foi desenvolvido para ir de encontro às especificações das simulações da manufatura aditiva, nomeadamente:

- Virfac da GeonX. Baseado em simulações de cordões de solda, este software está adaptado ao processo de cama de pó e um modelo novo do processo de projeção de pó será integrado brevemente;
- O Simufact Additive Manufacturing parece bastante completo, simulando o processo aditivo no seu todo, para determinar as tensões inerentes no produto final;
- SolidThinking Inspire,
- 3DSIM: com ExaSIM, é dedicado à sintetização de laser.
- Project Pan: está focado em powder bed, Wire-Fed e Power-Fed. Mas oferece um modelo que dá os parâmetros de manufatura para limitar as tensões inerentes do produto final.

## 2.7 Otimização Topológica

### Introdução

A otimização topológica é uma técnica que define a melhor repartição do material para obter um design ótimo. Para isso, a utilização do item e os vários stresses aplicados são tidos em consideração. As características do design são modeladas, como o número, localização e forma dos furos, etc. (Driessen [83]).

A otimização topológica é utilizada para redefinir a topologia da peça mantendo apenas o material necessário (limites, número de furos, etc.) e aumentando o potencial de otimização. Para Takezawa [84], entre os diferentes tipos de otimizações, a otimização topológica é aquela que oferece a melhor forma de encontrar o design funcional ótimo da peça. Duas formas são normalmente consideradas: contínua e abordagens discretas.

A abordagem contínua ou o método de homogeneização (Bendsoe e Sigmund [85]) é um método comum baseado num modelo de densidade. A peça é dividida num número finito

de variáveis infinitesimais. O espaço do design (a azul na Figura 2-18) está dividido em volumes infinitesimais. Uma variável é associada à densidade de cada volume. As variáveis podem ter dois valores: 1 se a densidade for positiva (o volume é mantido, a vermelho na Figura 18) ou 0 se a densidade for nula (o volume é removido, a branco na Figura 2-18). Então a geometria da peça após o processo de otimização é a que é formada pelos volumes infinitesimais de densidade positiva. A principal vantagem deste método é a do desenho ótimo não depender da geometria inicial. A abordagem não é influenciada por nenhum preconceito positivo ou negativo. O método conduz a geometrias muito diferentes dos designs habituais que podemos pensar inicialmente.

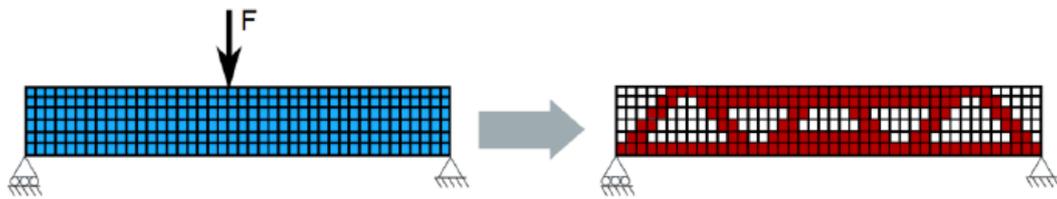


Figura 2-18. Ilustração do processo contínuo de otimização topológica.

A segunda abordagem é com os elementos discretos. Está baseada nos elementos básicos da mecânica estrutural (... pilar, casca...). Este método é uma combinação de múltiplos tipos de otimização (escala, forma e topologia), mais do que uma técnica de otimização topológica em si mesma. A modificação da estrutura é feita com a adição ou remoção de alguns elementos. Desta forma, o designer lida com elementos, com os quais costuma trabalhar e é mais fácil para ele prever o impacto das mudanças no comportamento global da estrutura. Por outro lado, o resultado final depende claramente da geometria inicial. Para ilustrar este método, o mesmo exemplo do utilizado na Figura 2.19. O feixe inicial é modelado pela montagem de vários feixes pequenos. O designer pode escolher manter ou não os pequenos feixes. O resultado final na Figura 19 está aproximado ao processo contínuo, mas é mais dependente da geometria inicial e da posição inicial dos feixes pequenos.

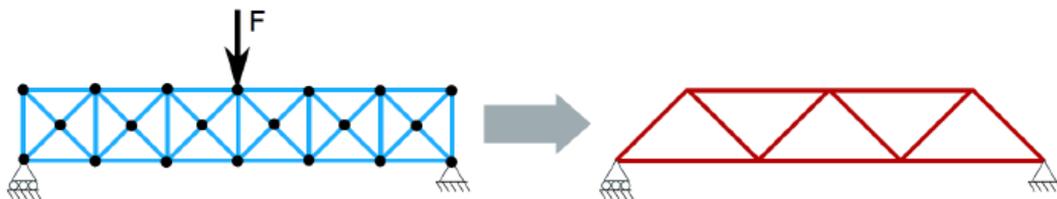


Figura 2-19. Ilustração do processo de otimização discreto.

Entre os diversos tipos de problemas de otimização, a otimização topológica contínua parece ser a melhor forma de tirar partido das oportunidades da manufatura aditiva (Ponche [70]). De facto, este método é o melhor, se considerarmos que o espaço inicial do design não tem impacto no resultado final. Por isso nos focamos neste tipo de otimização.

## Técnicas de otimização contínua

Um dos métodos mais usados habitualmente é o método da penalização (SIMP - Solid Isotropic Material with Penalization) apresentado por Bendsoe [85]. Este método usa um modelo de rigidez penalizada para interpolar o módulo de elasticidade do material:

$$(x) = x_e^p E_0 \quad (4)$$

Com  $(x)$  o módulo de elasticidade do elemento e,  $x_e^i$  o design ou variáveis da densidade dos elementos,  $E_0$  o módulo de elasticidade dum elemento sólido e  $p$  o parâmetro penalização.

Na abordagem SIMP, o parâmetro penalização geralmente escolhido é maior do que 1 (frequentemente  $p=3$ ). Este método de interpolação conduz a densidades intermédias que não são adequadas devido à sua baixa rigidez comparada com a sua densidade (Driessen [83]). Alguns autores como Zegard [86] usam uma versão diferente do modelo para evitar algumas dificuldades.

A técnica “void-solid” também é habitualmente utilizada com o algoritmo BESO para a otimização da manufatura aditiva já que oferece resultados bastante interessantes. Existem outros métodos tais como algoritmos genéricos ou algoritmos de determinação do nível (level set), mas ainda não provaram a sua capacidade de resolver os problemas de forma clara (Brackett [87]).

O software de otimização topológica está atualmente desenvolvido de forma a levar em consideração as principais limitações induzidas pelos processos comuns da manufatura. Um dos factos mais importantes da manufatura aditiva é precisamente o da maioria das limitações à manufatura não se aplicar a este processo aditivo. Na verdade, a manufatura “Layer-by-Layer” permite todas as geometrias, particularmente as que são impossíveis de produzir com as técnicas de manufatura comuns: os designs da peça não têm praticamente restrições no processo de manufatura exceto as necessidades do utilizador (resistência dos materiais, formas, etc.). Graças ao processo de impressão, o aumento da complexidade da peça não significa um produto mais caro: o custo da manufatura é quase o mesmo dos processos comuns ou poderá ser mais barato se não forem usados suportes.

### As principais dificuldades com a otimização topológica na manufatura aditiva

#### *Dimensão da malha*

A primeira restrição da otimização topológica no processo da manufatura aditiva é a dimensão máxima dos elementos da malha de forma a obter uma otimização topológica significativa. De facto, a manufatura aditiva permite espessuras de parede muito finas. Mas a otimização topológica requer no mínimo 2 ou 3 elementos por cada espessura. Isto conduz a elementos muito pequenos e a um grande número de elementos para constituírem a malha toda; logo o tempo necessário para otimizar a peça topologicamente aumentaria drasticamente.

### *Limitações da manufatura*

Alguns designs necessitam de suportes devido aos seus ângulos inclinados (com o plano horizontal) e o método de manufatura usado (gradiente de temperatura mais ou menos importante). Dependendo na inclinação do ângulo, existe um valor de distância máximo, no qual a manufatura aditiva pode ser realizada. Por exemplo, o estudo do Brackett [87] mostra que com um ângulo de 25°, a distância máxima é de 15 mm, com um ângulo de 30°, a distância máxima é de 20 mm e não há limite se o ângulo for superior a 45°. Noutros casos, o uso de suportes é necessário.

O acabamento da superfície das peças produzidas é geralmente insatisfatório. Uma etapa de acabamento deverá ser realizada por forma a obter um produto funcional. Isto significa que um acesso a todas as superfícies é necessário, embora isto nem sempre seja possível.

A otimização topológica está baseada numa forma discreta da peça, da qual alguns elementos são retirados. Normalmente, é necessário suavizar as superfícies após a otimização topológica. Alguns softwares como o Materialise Magics, Netfabb Studio e Marcam Autofab fazem a exportação da geometria suavizada, caso contrário, o designer terá de fazê-lo ele próprio com o software CAD. O módulo OSSmooth da Optistruct faz exatamente isso. Este módulo permite a modificação direta da geometria ou a mistura entre designs otimizados e designs locais CAD (importados em “.stl”).

Finalmente é importante sublinhar que cada design novo deve ser simulado duas vezes: uma primeira para simular a manufatura e definir as tensões inerentes, a segunda para verificar a resistência do material.

### *Materiais únicos ou múltiplos para manufaturar?*

Alguns dos processos de manufatura são mais adaptados à manufatura multimaterial do que outros. Os processos de manufatura por jet (impressão 3D) ou por extrusão são particularmente adequados à produção de multimateriais, enquanto a powder bed, SLM/SLS e as técnicas de estereolitografia são processos para materiais únicos (Brackett [87]).

## O Software

Entre o software possível, o TOSCA (FE Design) foi testado por Brackett [78]. Este software comercial não é bem adaptado à otimização topológica na manufatura aditiva de peças porque só existem 2 refinamentos de camada possíveis para cada espessura. Adicionalmente, o nível de remeshing necessário para a AM de peças não é suficiente.

Atualmente, a espessura do cordão de solda é a única limitação que deverá tomar-se em conta numa otimização topológica. Esta limitação pode ser encontrada no Optistruct (e 3-MaticSTL para o pós-tratamento da geometria antes da manufatura) de Altair e Nastran (MSC).

Entre o software comercial, os mais vulgarmente utilizados são:

- Materialise Magics,
- Netfabb Studio,
- Marcam Autofab,
- NX Hybrid Additive Manufacturing (permitindo a prototipagem, a manufatura e a reparação dos produtos),
- MI: Additive Manufacturing,
- GENESIS Topology (Ansys),
- 3DSIM (incluindo um módulo de simulação da manufatura).

## 2.8 Estratégias de Scan

Como já referido neste documento, alguns estudos já sublinharam que a estratégia de scan escolhida para a manufatura aditiva impacta a geometria final do produto (Bo [73]). Assim diverso software foi desenvolvido para a obtenção de trajetórias ótimas como:

- PowerCLAD,
- O módulo Grasshopper de Rhino (Duballet [19]); que também pode ser usado para a otimização topológica (Ren [20]).

O PowerCLAD está baseado nos módulos PowerSHAPE e PowerMILL desenvolvidos pela Autodesk (anteriormente designada por Delcam) e pela IREPA LASER. Do módulo PowerMILL, as trajetórias de maquinação foram invertidas e a colisão entre a ferramenta e a peça em bruto, de forma a definir as estratégias de scan. Assim, para inverter a estratégia comparada com os processos clássicos de manufatura, também se pode aplicar a outro software CAM como o CATIA. Mas a Dassault Systems escolheu desenvolver o seu próprio módulo, «Delmia», para determinar as trajetórias. De forma parecida, a Siemens acrescentou um novo módulo ao seu software CAD NX (dedicado à manufatura aditiva) chamado «Nx Hybrid Additive Manufacturing».

Finalmente, cada construtor de máquinas dedicado à manufatura aditiva tem de fornecer uma solução (geralmente um software “caseiro”) para gerar estratégias de scan. Os mais conhecidos são Cura 3D e o MakerBot Print.

## 3 MANUFATURA ADITIVA – OFERTA TECNOLÓGICA

### 3.1 Motivação e Potencial

A manufatura aditiva (AM), popularmente conhecida como impressão 3D, promete transformar fundamentalmente o desenvolvimento desde o conceito à produção de novos produtos. Desde que esta tecnologia se tornou popular com a prototipagem rápida de componentes de polímeros, a capacidade tecnológica de produzir componentes metálicos por AM tem o potencial de ser um verdadeiro “agente de mudança”. A AM já não é um mero atalho que permite aos designers e engenheiros materializar rapidamente os seus conceitos de modelos digitais em protótipo físicos, em vez disso, o processo de AM oferece a possibilidade de criar produtos completamente novos que não poderiam ser fabricados usando os métodos de produção convencionais.

As tecnologias AM podem revolucionar mundialmente muitos setores de fabrico, reduzindo o tempo de comercialização, custo, desgaste de material, consumo de energia

e emissões de carbono. Além destes factos, a AM vem trazer novas metodologias e novas capacidades de produção que até agora estavam limitadas com o uso dos processos de produção convencionais subtrativos, vem abrir novas fronteiras ao ciclo de vida do equipamento e dos componentes permitindo-lhe alongar a vida das peças em serviço através de metodologias de reparação inovadoras ou através da produção de peças de substituição sem a necessidade de ferramentas em muitos casos já obsoletas. Como exemplo, podemos citar o caso da indústria aeroespacial em que o uso destas capacidades em direcionar a AM podia levar a uma redução de matéria-prima nova necessária à manufatura dum componente já em serviço, conhecido por "buy-to-fly".

A capacidade em explorar o uso potencial da AM também pode levar ao surgimento de inovações nas estruturas leves, que poderiam ser utilizadas em veículos aéreos não tripulados, numa primeira instância e mais tarde poderiam ser aplicadas na indústria da aviação em geral, numa primeira fase na produção de componentes não estruturais e depois nos componentes primários. Abaixo a (Figura 3-1) apresenta o que será um ciclo típico do processo de AM.



*Figura 3-1. Fluxo do processo AM. [39]*

A tecnologia para a produção de componentes metálicos para a AM está atualmente numa fase ativa de desenvolvimento em que a produção de componentes, tecnicamente fiáveis e reproduzíveis perfeitamente funcionais já é possível.

Contudo, é claro que apenas através da combinação do design virtual do produto, incluindo CFD, FEM e outras ferramentas de análise numérica, e a aplicação de princípios otimizados de design para AM, se pode explorar o verdadeiro potencial da produção aditiva. Os subprocessos do desenvolvimento de componentes para a produção por AM mais usuais são os apresentados na Figura 3-2.



Figura 3-2. Fluxo de trabalho AM. [40]

Recentemente Caffrey e Wohlers conseguiram demonstrar a popularidade crescente do uso da AM - na produção de componentes metálicos, através do equipamento de monitorização das vendas de metal anuais - Figura AM 3-3.

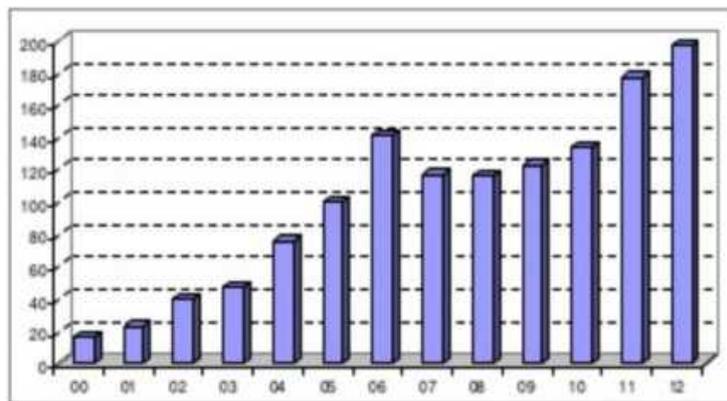


Figura 3-3. Vendas de equipamento AM. Fonte: relatório Wohlers 2013 [41, 42]

Em 2010, Holmstrom [41] sugeriu que os principais benefícios da manufatura aditiva, relativamente à manufatura subtrativa, seriam os seguintes:

- Não há necessidade de ferramentas de produção;
- Pequenos lotes de produção são possíveis e economicamente viáveis;
- Modificações ao design são facilitadas e de implementação rápida;
- Otimização do produto focada na função (ex. canais de arrefecimento otimizados);
- A capacidade de produzir geometrias complexas;
- O Potencial de simplificar a indústria da cadeia de fornecimento, tempos de entrega mais pequenos, menor dimensão dos inventários.

Em 2014, Ford [42] sugeriu que, à medida que a tecnologia da AM continua a evoluir, é provável que se deem as seguintes alterações:

- Menor tempo de comercialização devido à prototipagem rápida e aos ciclos de design, bem como a possível eliminação de muitas etapas da manufatura tradicional, tais como o transporte, a manufatura de moldes e a montagem;
- Maior competição resultando numa maior diversidade de soluções/ produtos devido à eliminação das barreiras à entrada;
- Cadeias de fornecimento menores, mais eficientes e mais baratas, especialmente para a produção de componentes complexos com volume de produção reduzido.

## 3.2 Previsão

É esperado que a manufatura em 2050 tenha um aspeto diferente, dado estar a mover-se duma produção barata em massa para uma produção personalizada, adaptada aos mercados globais. [65] [66]. As tecnologias AM permitem a produção limpa, com eficiência energética e controlo de material. Nestes anos a indústria da AM deslocou-se da prototipagem para a produção, onde os requisitos e complexidade são bastante maiores. O relatório Wohlers 2016 indica que o “ponto de viragem” da AM foi alcançado em 2012. Depois disso, grandes investimentos foram feitos na pesquisa e comercialização. Muitos fabricantes de equipamento apareceram em 2015 e continuarão a progredir impressionantemente nos próximos 5-15 anos [67].

O setor aeroespacial está a dar um impulso à AM. Neste sentido a GE abriu um centro de pesquisa de 32 milhões, na Pensilvânia em 2016. A US Federal Aviation Administration autorizou um dos seus componentes de AM, o qual será adicionado a 400 motores de reação das aeronaves comerciais. A GE está a trabalhar para conseguir a autorização dos injetores construídos por AM para uma nova geração de motores de reação. Estes injetores são 25% mais leves do que os convencionais [67]. A GE espera construir 100,000 peças por AM para os motores das aeronaves até 2020. A Airbus também tem planos de usar AM no seu futuro. Investindo nos métodos avançados de otimização topológica, pode conseguir-se uma redução de peso de 50% ou mais. As aeronaves AIRBUS contêm muitas peças em polímero e metal e planeia construir 30 ton de peças metálicas por mês até 2018 utilizando uma rede de sistemas AM. Deram igualmente formação em AM a quase 300 colaboradores adicionais em 2016 [67].

A escassez de matérias-primas, disponibilidade de bases “big data” [66] e a tendência de personalização do produto fazem da AM a alternativa perfeita à manufatura convencional. A previsão da AM toma atenção aos vários pontos a melhorar nesta tecnologia, em termos de a tornar viável à escala industrial.

- Produtividade e flexibilidade
- Recolha de Dados
- Padronização da qualidade
- Disponibilidade do material
- Equipas multidisciplinares e programas de formação

É esperada uma redução do custo do equipamento da AM de 25-45% até 2020. Os altos custos do equipamento da AM podem ser justificados por uma maior velocidade de fabrico, câmaras maiores e facilidade para carregar ou descarregar as peças entre outras.

Para aumentar a taxa de deposição e de produtividade, a principal pesquisa foca-se em vários pontos chave. Por exemplo, os lasers com maior potência estão a ser estudados [68]. Também o equipamento multi-laser usando mais do que um laser está a ser tido em conta, paralelamente ou no seguimento de estratégias diferentes, como as estratégias skin-core que usam um laser de alta potência para construir o centro e outro de menor potência para construir o revestimento que precisa de maior precisão. Sistemas de Multi-spot array montados na cabeça de um processador tipo impressora com remoção de fumos e gás de proteção local estão a ser pesquisados devido a vantagens como a rápida velocidade de fabrico e a dimensão ilimitada da câmara. Também o conceito de full powder bed illumination ou multi-jet fusion está em fase de desenvolvimento. Este sistema usa agentes químicos para reduzir ou amplificar o processo de fusão alcançando uma alta precisão da superfície, e máscaras para controlar a radiação do laser. Outra opção para reduzir o tempo do processo é a utilização de sistemas inovadores tornando possível uma deposição do pó mais rápida ou fazer em simultâneo os processos de deposição e de fusão.

A rugosidade e precisão da superfície podem ser otimizadas por um pós-tratamento por fresagem, polimento e/ou maquinação. Para este efeito, as máquinas híbridas integram a manufatura aditiva que aumenta a produtividade e reduz os tempos de espera. Também os conceitos de modularização e integração oferecem flexibilidade combinando e integrando periféricos, câmaras de fabrico maiores, o pós-processamento e um manuseamento automático ou uma estação de descarregamento reduzindo os custos de produção consideravelmente.

Os componentes complexos de boa qualidade são difíceis de conseguir. Para isso é importante criar e seguir metodologias para selecionar os parâmetros e as estratégias adequadas aos diferentes materiais. A integração e comunicação entre as máquinas, para recolha de informação e dos programas analíticos para a sua gestão, são de extrema importância. Além disso, a simulação é uma ferramenta útil para prever e controlar as distorções, stresses residuais e microestruturas, limitando o número de experiências.

No campo dos sistemas de monitorização e controlo, diferentes metodologias têm sido desenvolvidas para assegurar um processo de fabrico robusto sem diferenças em termos de qualidade e dimensões entre os lotes. O controlo da câmara permite a monitorização de qualquer irregularidade durante a deposição da camada, mas também os parâmetros físicos do laser e o nível de oxigénio e pressão da atmosfera. O controlo do processo por tanque de fusão oferece a monitorização da temperatura e da forma do tanque de fusão em tempo real com a ajuda de sensores de alta resolução. Isto melhora o rastreamento, qualidade, fiabilidade, repetibilidade e eficiência. Também existe software para programas de simulação que preveem o comportamento do tanque de fusão e do pó metálico.

Por outro lado, testes não-destrutivos (NDT) garantem a qualidade dos componentes fabricados. Neste campo a tomografia por computador é uma ferramenta útil para detetar a porosidade das geometrias complexas. Devido à imaturidade da AM metálica, as especificações de inspeção ainda estão a ser desenvolvidas e muitos fabricantes de métodos de inspeção estão a explorar novas metodologias para a AM [67].

A otimização topológica do design tem de ser melhorada com software especializado. Os designers irão mudar o seu modo de fazer design para uma forma mais funcional e menos assente na manufatura dando-lhes maior liberdade no design. O software de otimização topológica permite desings otimizados e eficientes com estruturas reticulares e de tipo biónicas aplicando algoritmos matemáticos. Nas estruturas reticulares, os materiais só são adicionados às zonas úteis, atingindo estruturas rígidas com a otimização do peso, que reduz o consumo do pó metálico e o tempo de fabrico.

A falta de uniformização, torna difícil a certificação e a normalização da manufatura aditiva para os campos em que a certificação é muito importante como o setor aeroespacial. A uniformização é necessária para obter um processo robusto. O processo de uniformização pode ser alcançado pela criação duma base de dados com as propriedades para as diferentes aplicações em função do material e parâmetros, e pela otimização das propriedades mecânicas em função dos tratamentos a quente e parâmetros do processo. A uniformização do design precisa da definição das regras de design e dos critérios de fabrico. Espera-se que no futuro estas regras sejam partilhadas e unificadas [69].

A quantidade de materiais disponíveis continua a crescer. Contudo, é necessário um aumento da escolha dos materiais. Estão a ser feitos desenvolvimentos na processabilidade de novos materiais metálicos como as super ligas Ni, ligas Al, metais refratários e aços martensíticos, entre outros. A criação de base de dados das propriedades dos materiais específicos construídos pela AM e pelos diferentes processos poderá fornecer informação ao design de ligas adequadas para a AM.

A EXMET desenvolveu um processo para construir peças em metal vítrico com a AM. Os metais vítricos combinam numa única propriedades como alta resistência, elasticidade, dureza, resistência à corrosão, condutividade e biocompatibilidade, todas elas bastante úteis na futura aplicação de alto valor na engenharia eletrónica, aeroespacial e mecânica [68].

Está a emergir um novo processo de fabrico para construir componentes multimaterial para funções específicas. Estão baseados na transição do material num corpo durante o processo de manufatura. Têm de demonstrar compatibilidade entre ambos os materiais. Podem ser feitos em duas câmaras diferentes ou através da troca de alimentador pela combinação de 3 materiais diferentes em proporções diferentes.

No campo da manufatura com pó, a tendência é a redução do preço dos pós e o aumento do volume da produção em pó. A METALYSIS é um processo novo de manufatura com pó que usa a eletrólise. As suas vantagens são a limpeza, o baixo consumo de energia e uma redução do custo de 75 % [68]. No entanto, é necessária uma metodologia que valide a manufatura com pó com novas tecnologias. Também é necessário um estudo aprofundado sobre a influência da reciclagem ou reutilização do pó mantendo boas propriedades das peças construídas.

Os requisitos futuros incluem programas educacionais e de formação, como pontos chave para fornecerem colaboradores qualificados, bem como a criação de equipas multidisciplinares que desenvolvam produtos complexos na AM [65]. Para atingir isto, a conceção do ensino e formação focada nas técnicas e tecnologias de AM metálica, desde a escola primária à secundária, universidade e a formação profissional são de extrema importância na inclusão de diversos papéis e dum maior número de profissionais qualificados neste campo [67].

### 3.3 A oportunidade de mercado

Este capítulo descreve o investimento atual nas tecnologias de AM a um nível global.

#### Europa

O mercado global da AM ultrapassou os \$ mil milhões em 2009, com receitas diretas dos sistemas e vendas de mais de \$ 500 milhões.

90% do equipamento da AM vendido são impressoras 3D que permitem a produção de componentes e equipamento baseada em polímeros, deverá tomar-se nota que a visibilidade deste tipo de equipamento está a contribuir definitivamente para o crescimento do mercado da tecnologia de AM. No início de 2010, um grupo de empresas liderado pela Materialise formou um grupo para fazer o marketing coletivo da AM. A reportagem de capa sobre uma questão recente da revista Britânica *The Economist* abordava o potencial da AM como uma tecnologia de manufatura revolucionária.

Embora atualmente a maior parte da atividade global da AM utilize os sistemas baseados em polímeros, têm havido uma grande atividade e interesse, também relativamente ao fabrico do metal. O fabrico do metal despertou o interesse principalmente devido à possibilidade de conferir a manufatura direta de componentes “near-net-Shape” (forma quase acabada) e em alguns casos até componentes finais, sem a necessidade de ferramentas ou maquinaria. Tem havido especial interesse na indústria aeroespacial e automóvel e nas indústrias biomédicas, devido à possibilidade de produção de componentes de elevada performance com uma redução no custo total de produção. Investigadores e líderes da indústria na União Europeia (EU) identificaram a AM como uma tecnologia-chave emergente.

Diversos países fora da EU aumentaram a sua consciência pela tecnologia AM deste há anos e, neste ponto, a América do Norte está na vanguarda no que se refere à adoção da AM. Contudo, a importância dada a estes sistemas e tecnologias tende a espalhar-se rapidamente a outros países, colocando a AM no centro do desenvolvimento da sua jurisdição nacional. Mas a situação dos diversos países na Europa não é homogénea como demonstrado abaixo:

---

**Bélgica**

O governo federal da Flandres Belga investiu num programa de AM para materiais denominado STREAM (Structural Engineering Materials through AM). O programa envolve universidades, centros de investigação e a indústria deu origem a três projetos financiados, iniciados em 2014. Os projetos visam desenvolver a selective laser sintering de polímeros e a selective laser melting de metais. Uma série de iniciativas educacionais têm sido desenvolvidas para a disseminação da tecnologia da AM [43].

---

**França**

A Associação francesa para a prototipagem rápida contribuiu para o aumento nos níveis de uniformização das tecnologias AM, ambos a nível nacional e internacional [43].

---

**Alemanha**

A Alemanha possui uma estratégia para a AM que se desenvolve através do estabelecimento de ligações de transporte (transport links) entre a comunidade científica e a indústria. O Direct Manufacturing Research Centre (DMRC), baseado na Universidade de Paderborn na Alemanha é uma junção entre a indústria e universidades para desenvolver as tecnologias da AM. O DMRC e o Estado Alemão de North-Rhine-Westphalia fizeram um investimento conjunto de mais de €2 milhões. Foi feito um investimento adicional de € 3,400,000 pelo Estado Alemão para suplementar o investimento equivalente feito pela indústria, o que deu origem a um orçamento global de cerca de € 11 milhões para o desenvolvimento dum plano de AM a cinco anos [43].

---

**Holanda**

Nos Países Baixos, o processo de desenvolvimento do produto tornou-se uma peça essencial. Por exemplo, o instituto de investigação Neerlandês TNO começou uma iniciativa partilhada de desenvolvimento – Penrose – com uma quantidade de parceiros industriais com o objetivo de desenvolver a próxima geração de ferramentas e dispositivos de AM com vista à produção industrial de componentes através do processo da AM [43].

---

**Portugal**

A estratégia Portuguesa para a Manufatura Aditiva cedo se alinou com as iniciativas Europeias na prototipagem rápida, nomeadamente nos moldes. Os projetos RTD também foram financiados e uma rede nacional para a prototipagem rápida (RNPR) foi criada. A indústria foi impulsionada pela curiosidade, mas com resultados limitados. O ano 2000 foi crucial para a alavancagem da prototipagem rápida, o desenvolvimento de sistemas, iniciativas e eventos. Após 2010, as iniciativas da “indústria 4.0” pelos Ministérios da Economia e da Ciência e Tecnologia aumentaram o interesse de vários setores de atividade, tais como a metalurgia, cerâmica, vidro, construção, saúde e aeronáutica. Presentemente, Portugal é competente em aplicações, mas o fornecimento de sistemas ainda está a despertar. Atualmente, a Portuguese Additive Manufacturing Initiative (PAMI) está em curso, o que irá interligar vários centros de investigação no campo da manufatura aditiva. Em 2016 o CDRSP recebeu o papel de coordenar uma plataforma nacional de manufatura aditiva pelo Ministério da Ciência.

---

---

## Espanha

Em Espanha, os centros de investigação privados tomaram a liderança nas aplicações industriais da AM e, nos últimos anos, muitas empresas star up estiveram diretamente envolvidas nestas novas tecnologias. Algumas regiões são bastante ativas e impulsionadoras nas iniciativas Europeias, como a Andaluzia, Astúrias, Catalunha e o País Basco, cobrindo vários setores de aplicação, como o aeroespacial, construção e transportes. O governo Espanhol, para além de canalizar o financiamento H2020, financia diretamente projetos específicos nas tecnologias e aplicações da AM.

Além disso, a ADDIMAT, a Additive & 3D Manufacturing Technologies Association de Espanha operada pela AFM, foi fundada mesmo no final de 2014 com um objetivo principal: juntar todas as forças do setor e acelerar a adoção da manufatura aditiva na indústria Espanhola. Hoje, ela representa mais de 60 organizações com perfis diferentes: fabricantes de equipamento, fabricantes de matéria-prima e peças, utilizadores finais, fornecedores de serviços, distribuidores e subsidiárias de comercialização, centros de investigação, universidades e centros de formação. [www.addimat.es](http://www.addimat.es)

---

## Reino Unido

O Reino Unido tem visto investimento significativo na AM numa quantidade de setores da indústria, como podemos ver pelos seguintes números: indústria do consumo contribuiu cerca de £ 2,500,000 para alavancar cerca de £ 7,500,000 de apoio Estatal, a indústria automóvel contribuiu cerca de £ 3,500,000 para alavancar um apoio Estatal cerca de £ 6.5 milhões em atividades e investigação em AM e o setor médico assegurou um investimento de £ 3 milhões para suplementar o financiamento de £11.5 milhões nesta área. Ao mesmo tempo, a indústria aeroespacial do Reino Unido investiu £13 milhões no desenvolvimento na área da AM. Mais recentemente, o Governo Britânico investiu £30 milhões em partes iguais com a indústria pelo período de sete anos para o desenvolvimento duma nova tecnologia aeroespacial. O EPSRC-Engineering and Physical Sciences Research Council também libertou um financiamento de £ 4 milhões para o desenvolvimento da AM.

A aposta mundial na manufatura aditiva, e com especial ênfase na Europa como poderá ver acima nos vários aspetos e setores, deverá ser alavancada porque nesta área as tecnologias, apesar dos 27 anos de história e evolução, ainda estão numa fase de germinação e ainda há muito espaço para o desenvolvimento e afirmação das empresas Portuguesas nos campos já identificados desde as aplicações para o desenvolvimento e manufatura de sistemas (equipamento + materiais) [43].

---

## Estados Unidos da América

Em 2012, o National Additive Manufacturing Innovation Institute (NAMII), 22 projetos de investigação financiados com \$ 13,500,000 de investimento público e \$ 15 milhões de investimento na indústria. Ele também foi responsável por lançar uma série de projetos de investigação geridos por agências públicas que receberam mais de \$ 7 milhões de financiamento. Em Março de 2014, foi anunciado que o Governo Federal aumentaria o seu compromisso de financiamento em \$ 50 milhões. [43].

## Ásia

Os países Asiáticos também estão a investir. De facto, 26.4% de todos os sistemas industriais instalados pelo mundo estão na região Ásia/ Pacífico. Na Província de Anhui(China), a Hefei, a Bozhou e a Xery3D estão a investir conjuntamente cerca de \$ 245 milhões por um período de seis anos para desenvolverem a impressão 3D. Em Abril de 2014, o Ministério da Economia, Comércio e Indústria (METI) do Japão investiu mais de \$ 36,500,000 para lançar uma nova associação de investigação para desenvolver a tecnologia da AM metálica. Em Março de 2013, o Governo de Singapura anunciou que iria investir cerca de \$ 400 milhões por um período de cinco anos nas tecnologias da manufatura avançada. Ao mesmo tempo, a Nanyang Technological University irá construir um centro de investigação em AM associado a um plano de investimentos de \$ 30 milhões.

O Ministério da Ciência e Tecnologia em Taiwan iniciou um programa para desenvolver a impressão 3D com um financiamento anual de \$2.33 milhões.

## África do Sul

Durante o ano de 2013 foram investidos na África do Sul mais de \$ 10 milhões na AM com cerca de 80% do investimento focado nos sistemas da AM pertencentes à categoria da impressora pessoal a 3D. A África do Sul parece estar disponível para aumentar o investimento na área da AM e explorar áreas específicas, como a indústria médica e aeroespacial [43].

## Austrália

O Advanced Manufacturing Cooperative Research Centre (AMCRC), uma grande iniciativa de desenvolvimento na Austrália financiou uma quantidade de projetos baseados na AM e lidera um consórcio para estabelecer um Centro Nacional para o desenvolvimento da AM que deverá ter acesso a um investimento de AU\$ 50 milhões durante sete anos. Os países Europeus também desenvolveram as suas competências nacionais na AM, estando sensíveis aos avanços na expansão e comercialização das tecnologias [43].

### 3.4 Quadro da Indústria

Relativamente à indústria aeronáutica, que requer peças leves, resistentes, geometricamente complexas e normalmente produzidas em pequenas quantidades, a aplicação das tecnologias da AM remonta a 1988, quando algumas empresas começaram a testar esta tecnologia. Com a passagem do tempo, a adoção das diferentes tecnologias da AM tem aumentado em todos os setores. Atualmente, de acordo com o relatório de Wohler de 2013, a indústria aeroespacial contribui para a Defesa com cerca de 10.2% das receitas globais da AM de 2012. Só nos EUA, a indústria da manufatura aeroespacial (tradicional e aditiva) caracteriza-se por um rendimento de \$ 157.7 mil milhões, estimado em 2011 em. A indústria aeroespacial é responsável por cerca de 12.1% da produção

aditiva, com valores estimados em cerca de \$ 29,800,000, que representam menos de 0.05% do valor total da indústria aeroespacial dos EUA.

A indústria aeroespacial está cada vez mais atenta à AM vendo-a como a resposta para a redução do custo de desenvolvimento de protótipos e até como uma alternativa para criar componentes funcionais. Numa tentativa de reduzir o peso da aeronave, a indústria está a apostar de forma crescente em peças para aeronaves feitas de materiais leves, que são geralmente caras. As características das tecnologias AM, a sua capacidade para reduzir a matéria-prima ao mínimo, otimizar o peso, o custo e o tempo de entrega, convertem a AM numa opção viável. O quadro seguinte pretende apresentar algumas aplicações atuais e futuras na indústria aeroespacial:

*Quadro 3-1. Aplicações Gerais da tecnologia AM na indústria automóvel, aeronáutica, espacial e moldes [44]*

Aplicações atuais	Aplicações Futuras
Prototipagem e desenvolvimento conceptual	Incorporação da eletrónica pela manufatura Aditiva diretamente nas peças
Produção de peças suplentes	Manufatura Aditiva das asas das aeronaves
Produção de peças com desperdício mínimo de matéria-prima	Produção de componentes diretamente no local de reparação - on site repair
Produção de componentes com estruturas internas complexas	Produção de peças complexas para motores

Desafio	Produto resultante
Injetores de abastecimento dos motores GE LEAP (General Electric and Morris)	 Injetor de abastecimento 25% mais leve e cinco vezes mais resistente ao desgaste do que a peça convencional [45].
Jet engine GENx (General Electric)	 Motor Jet com um funcionamento pleno capaz de atingir 33,000 RPM [46]
UAV maior, mais rápida e mais complexa produzida pela AM (Stratasys and Aurora Flight Sciences)	 Redução de 50% no tempo de desenvolvimento da engenharia e da produção [47]

<p>Injetor do motor de foguetão (NASA Aerojet and Rocketdyne)</p>	 <p>[48]</p>	<p>Desenvolvimento da engenharia, produção e ensaios dum componente crítico como o injetor do motor de foguetão com redução de 70% nos custos</p>
<p>Suporte de cabine para o Airbus A350 XWB (Airbus and Concept Laser GmbH)</p>		<p>Peça impressa usando Titânio (Ti) com redução de peso de mais de 30% [49].</p>
<p>Demonstrador de um modelo de asa (Concept Laser GmbH)</p>		<p>Protótipo da capacidade de produção aditiva de estruturas leves (produzido em fase única) [50]</p>
<p>Conduta de gás (RSC Engineering GmbH)</p>		<p>Design otimizado duma conduta de emissão[51].</p>
<p>Modelo de motor (Concept Laser GmbH)</p>		<p>Motor a combustível produzido em aço inoxidável incluindo as engrenagens e cobertura das asas em 3D [51].</p>
<p>Combustores (Concept Laser GmbH)</p>		<p>Protótipo das capacidades do processo da produção aditiva, prova a capacidade para produzir paredes internas em espiral.</p>
<p><b>Desafio</b> <span style="float: right;"><b>Produto resultante</b></span></p>		
<p>Conexão universal</p>		<p>Protótipo duma engrenagem funcional</p>
<p>Ferramenta de engrenagem oca (VBN Sweden)</p>		<p>Menor tempo de entrega, menor desperdício e peso reduzido da ferramenta em 40% [51].</p>

Suporte de componentes múltiplos  
(Airbus and 3T)



Peça única com menos 35% de peso.  
O suporte produzido pela AM é 40% mais rígido do que o componente original e também reduz o desperdício produzido pelos métodos convencionais [52].

Motor de tanque AbramsM1AGT1500  
(Optomec)



Motor de tanque AbramsM1AGT1500 utilizando os sistemas LENS da AM [53].

Injetores a combustível numa espiral  
(Morris Technologies)



Produção de design extremamente complexo, produzido como uma peça única, enorme redução do tempo de produção (2 semanas vs. 6 semanas), 50% de redução no custo e aumento da robustez [54].

Incerteza na modelação por injeção termoplástica (Renishaw)



Produção de design extremamente complexo, durabilidade e melhor desempenho.

Conduitas de refrigeração para a Motosport (Green Team and Renishaw)



Suporte de eixos e condutas de refrigeração feitas para melhorar a capacidade de refrigeração, design complexo.

## Desafio

## Produto Resultante

Incerteza na modelação por injeção termoplástica (Linear Moulds)



Tempo do ciclo otimizado, maior durabilidade da inserção de ferramentas.

Tubos de escape Koenigsegg One (Koenigsegg)		Tubo de escape do super carro Koenigsegg One: produzida em titânio, permitindo um ganho de 400 gr no peso num tempo de produção de 3 dias [55]
Geometria variável no turbo Koenigsegg One (Koenigsegg)		Geometria variável no turbo produzido numa só fase com peças internas móveis de alto desempenho. [55]
Proteção em titânio Roll up ARC para F1 (T RPD @ LTD, Within Technologies)		Produção de design extremamente complexo de proteção em arco aprovada em titânio para um F1.

Apesar dos projetos já submetidos representarem importantes avanços nas tecnologias da AM nos setores de atividade das indústrias selecionadas para este projeto, existem fatores como as limitações da dimensão os componentes a serem produzidos pela AM que têm limitado a adoção mais ampla destas tecnologias pela indústria. Os problemas com os materiais, precisão, acabamento da superfície e padrões de certificação são desafios adicionais que procuram garantir a adoção duma solução generalizada destas tecnologias pela indústria. Portanto, o aumento da dimensão e da complexidade das aplicações futuras estão a orientar a investigação para melhorar o controlo dos processos produtivos, dos materiais e da inspeção, de forma a assegurar a segurança e a monitorização dos componentes produzidos, visando a sua utilização enquanto componentes finais.

Frazier [56] apresentou alguns dos desafios técnicos específicos da AM que necessitam de ser ultrapassados para o uso operacional da indústria tecnológica, e em especial da AM na força aérea, tornados realidade:

- Tem de ser compreendido e controlado o efeito da variabilidade máquina-para-máquina;
- Deveriam ser desenvolvidas especificações e padrões da indústria para o processamento dos componentes. Para atingir este objetivo, Frazier sugere que seja dada prioridade ao desenvolvimento de processos integrados, através do desenvolvimento de tecnologias de monitorização e controlo dos processos de produção;
- Deverão haver alternativas aos métodos de qualificação baseados em modelos validados, métodos probabilísticos e peças padrão, ente outras; há necessidade de novos padrões e de ensaios avançados não destrutivos capazes de detetar defeitos críticos com um elevado grau de certeza;
- São necessárias novas instruções para o design com características estruturais inovadoras, por forma a produzir componentes otimizados em termos estruturais e de peso. É necessária a validação dos modelos virtuais baseados em modelos físicos por forma a prever as características da microestrutura, das propriedades mecânicas e eletroquímicas;
- Deveriam ser desenvolvidos novos materiais por forma a otimizar o processo de produção e as propriedades finais dos componentes;

- Deve ser expandida a compreensão de como se obtêm melhores propriedades de fadiga e do acabamento da superfície.

O verdadeiro potencial da AM só pode ser alcançado caso o processo de desenvolvimento da engenharia seja otimizado e as vantagens desta nova tecnologia de manufatura sejam totalmente abraçadas. No entanto, isto também significa que os atuais projetos de componentes tenham de ser totalmente revistos.

## Materiais metálicos atualmente disponíveis para a produção aditiva

A seleção e uso de determinado material é fundamentalmente definida pelos requisitos de utilização finais, mas isto também é influenciado pela tecnologia aditiva utilizada.

As super ligas baseadas em titânio e níquel (por exemplo a Inconel), aços inoxidáveis e de alta resistência são os materiais mais frequentemente usados na manufatura aditiva, que deste modo viabiliza o processamento de materiais caros, difíceis de maquinar, em benefício da produção aditiva e tirando benefícios económicos com a redução do material empregue e redução do tempo de produção dos componentes.

As tecnologias AM baseadas em laser, feixe de eletrões e arco de plasma podem provavelmente processar a maioria dos metais, mas ainda assim requerem alguma pesquisa para assegurar a total compreensão e mestria de cada um destes processos e para cada um dos materiais disponíveis, levando a indústria a focar-se no processamento dos materiais que se pretende que sejam economicamente mais atrativos, dada a dificuldade no processamento convencional. Os processos de deposição de material em pó apresentam um potencial enorme uma vez que podem usar múltiplos bocais de deposição dos materiais, permitindo mudar a composição química do material depositado, na mesma peça, adicionalmente aos rácios de deposição e precisões diferentes, dependendo da dimensão e uso da peça [64].

### 3.5 Tendências da Indústria Aeroespacial

#### Introdução

Hoje em dia, a AM pode proporcionar uma liberdade de design e vir revolucionar a indústria de em vários setores, tais como o aeroespacial, automóvel, a energia, o setor médico, a instrumentação e os bens de consumo. Na Figura 3-44, foi incluída a atual distribuição das tecnologias de AM enquanto função do setor industrial. Particularmente, no caso do setor aeroespacial, uma tendência crescente das tecnologias AM tem sido observada, de 9.9% até 16.6% no período de 2011 a 2016 [1].

A indústria aeroespacial cedo adotou a AM e começou a explorar as suas aplicações. A Boeing e a Bell Helicopter começaram a utilizar peças em polímero AM para a produção de aplicações não estruturais em meados dos anos 90. A Boeing instalou dezenas de milhares de peças para a produção aeronáutica, representando mais de 200 peças únicas em 16 aeronaves comerciais e militares. A NASA, a Agência Espacial Europeia, a SpaceX e

outras organizações estão a explorar o uso da AM nos detonadores e nas câmaras de combustão nos motores de foguetões.

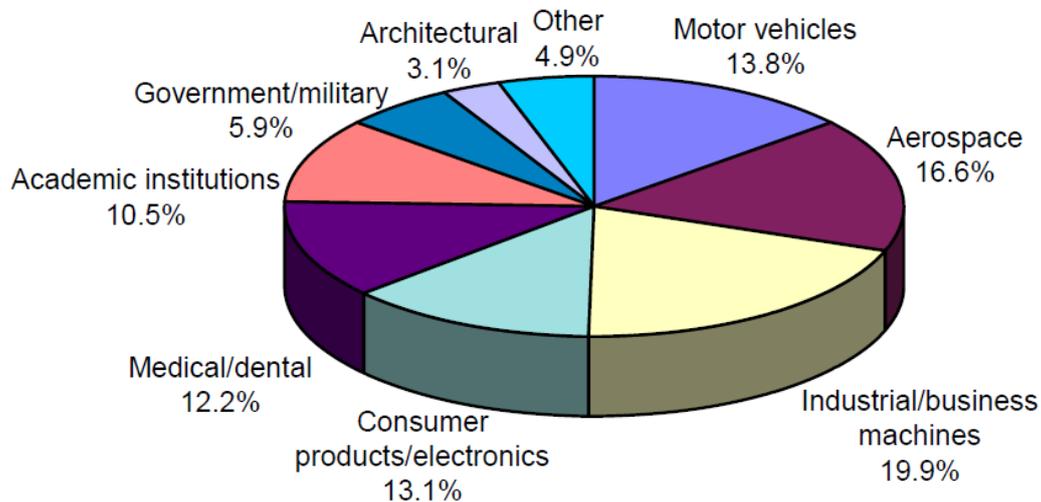


Figura 3-4. AM aplicada aos maiores setores industriais [1].

A indústria aeroespacial tem uma pressão constante e requisitos rigorosos no sentido de melhorar a eficiência da aeronave, de reduzir o ar e poluição sonora, sustentabilidade e controlo das emissões de gases. Estes aspetos requerem que a indústria aeroespacial opere de forma eficiente, elevando as capacidades de manufatura e das tecnologias aos limites.

Neste sentido, a AM é um caminho alternativo atrativo para este setor devido essencialmente à grande eficiência no uso do material e capacidade de processamento de materiais aeroespaciais gradativos, como as ligas de titânio e níquel. Para além disso, a AM é vista como uma tecnologia capacitadora do baixo peso ou da prototipagem rápida, devido à sua liberdade de design e possibilidade de criar estruturas complexas; o que pode levar a benefícios adicionais de aumento do desempenho e redução do desperdício. Outra área de interesse para a aplicação da AM na indústria aeroespacial é a área de ensaios dos designs complexos ou difíceis de implementar, incluindo ensaios extensos nas unidades de motor completas.

As áreas de aplicação da manufatura Aditiva (AM) estão intimamente ligadas à seleção do material, bem como da tecnologia. Algumas das maiores aplicações para a tecnologia da AM estão classificadas por área de especialidade, como a indústria aeroespacial e automóvel, indústria biomédica, arquitetura, distribuição e joalheria.

A redução do peso e o aumento do rácio de resistência vs. peso são transversais a muitos setores industriais. O aeroespacial é um dos setores onde a redução de peso é fundamental. A produção de peças aeroespaciais tornou-se muito dispendiosa com a utilização dos processos convencionais devido a operações de elevado desperdício. Com a utilização dos processos da AM na indústria aeroespacial, as peças podem ser redesenhadas para diminuição do peso, o que significa custos de fabrico menores. Também o menor peso das peças estruturais aeroespaciais tem repercussões na redução do consumo de combustível.

As vantagens oferecidas pela AM podem ser resumidas no seguinte: redução do uso de matéria-prima, redução dos rácios de buy-to-fly, livre das limitações geométricas e redução da utilização energética.

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

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

Em resumo, **a AM oferece as seguintes vantagens à indústria aeroespacial** [24]–[26]:

(1) **Redução do prazo de execução: processo de desenvolvimento e tempo de comercialização mais curtos.** A AM permite a prototipagem rápida e a revisão e validação do design concetual. O fabrico da instrumentação deixa de ser necessário e pode-se passar diretamente às peças acabadas. Para a produção de baixo volume, como a produção para demonstração, a AM reduz ou elimina o custo da instrumentação cara e a sua fraca amortização. Ela também se adequa bem à engenharia colaborativa e aos aspetos de R&D.

(2) **Flexibilidade no design.** O elevado nível de complexidade das peças, redução do peso do componente e melhoria do desempenho e fiabilidade das peças. A AM oferece uma capacidade de design topológico otimizado e flexibilidade superior em termos de geometrias possíveis, podendo ser construídos componentes mais complexos. A AM também oferece aos designers a possibilidade de alto desempenho sem limitações da manufatura. Além disso, a indústria aeroespacial já conseguiu manufaturar aditivamente alguns componentes aeroespaciais com geometrias complexas feitos de materiais exóticos como o Titânio Ti6Al4V e o Inconel 718, que são tradicionalmente difíceis de moldar sem comprometer as suas propriedades (e desejáveis) excelentes.

(3) **Redução de ambos os custos de produção e custos operacionais.** A elevada liberdade no design permite diminuir a quantidade de subcomponentes que compõem os sistemas de montagem, a quantidade de componentes, o tempo de montagem e os custos (A AM assiste na instrumentação, soldadura, inventários e, em alguns casos, nas linhas de montagem completas). A redução do peso também traz vantagens competitivas à redução de custos. Por outro lado, considerando os componentes espaciais, os veículos espaciais necessitam de peças intrinsecamente concebidas também, para minimizar o espaço da embalagem e o peso. Produzidas em pequenas quantidades, elas são caras e consumidoras de tempo se forem fabricadas tradicionalmente.

(4) **Redução dos impactos ambientais negativos da produção.** Como consequência da redução do peso dos componentes aeroespaciais, é expectável um menor consumo de combustível e das emissões de CO<sub>2</sub>.

Também vale a pena mencionar que um dos fatores na manufatura de componentes aeroespaciais de elevado valor é o **rácio crescente buy-to-fly de componentes metálicos** (com valores de rácios BTF tipicamente entre 5 e 20). A Figura 3-5 sublinha porque a AM é um caminho alternativo potencial tão atrativo, devido essencialmente à elevada eficiência da utilização do seu material e capacidade de processar ligas aeroespaciais gradativas titânio e níquel.

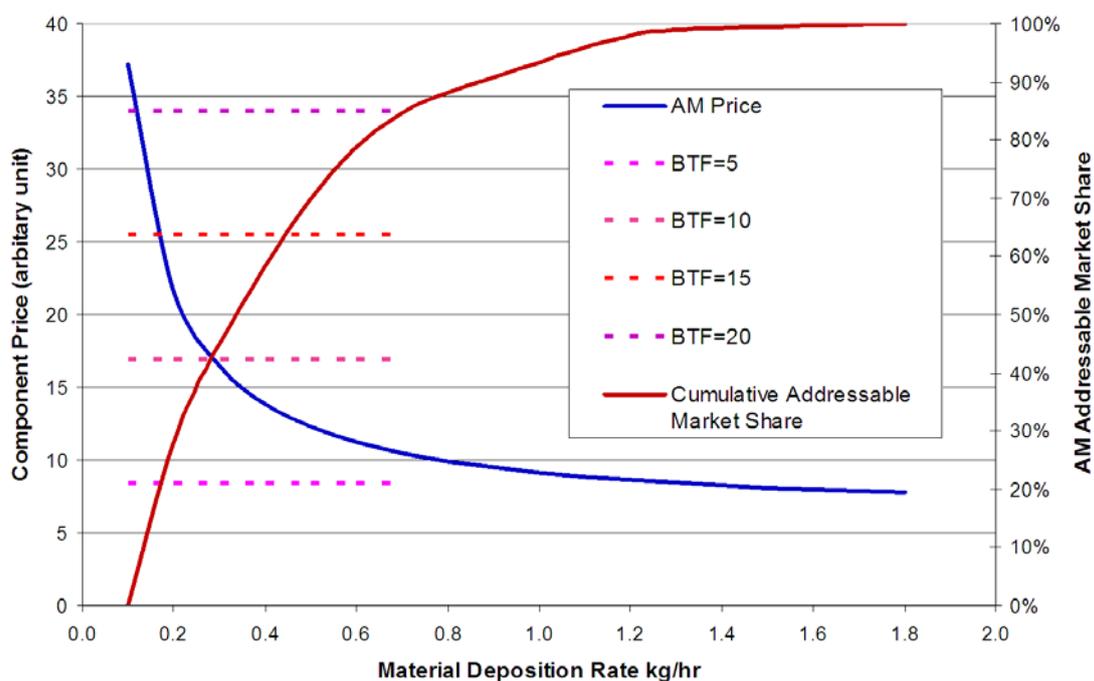


Figura 3-5. Análise da componente Preço vs. Taxa de deposição de material (metal) na AM, com o ponto “break even” comparado com a manufatura tradicional de maquinaria nos típicos rácios buy to fly aeroespaciais [27].

## Desafio à utilização da Manufatura Aditiva no aeroespacial

Os principais desafios à obtenção de *qualidade aeroespacial*, podem assim ser resumidos:

- **Design:** as atuais ferramentas de design não permitem tirar uma vantagem total da AM, porque faltam as características específicas, a compatibilidade com as máquinas da AM não está garantida e as regras do design não estão totalmente estabelecidas. E ainda, os designers estão limitados pelas regras dos processos de manufatura convencionais.
- **Matéria-prima:** as propriedades físicas (morfologia, fluidez, distribuição da dimensão das partículas, humidade, ...) e químicas (nível de impureza, conteúdo intersticial, ...) dos pós para AM não estão completamente definidas para obter a *qualidade aeroespacial*. Também, não existem especificações de manuseamento e de reciclagem para garantir a monitorização e evitar a contaminação da matéria.

- **Processamento:** hoje o processo da AM não garante totalmente a robustez, repetibilidade e a fiabilidade porque duas máquinas do mesmo fabricante podem produzir diferentes qualidades em cada peça. Às máquinas de AM falta a monitorização do processo e o parâmetro do processo sobre o impacto na qualidade final do produto, não é totalmente compreendido
- **Pós-processamento:** diferentes tratamentos de pós-processamento são atualmente aplicados nas peças da AM incluindo os tratamentos térmicos (fornos de vácuo, alta compressão isostática (HIP) ...), tratamentos de superfície (polimento eletroquímico, polimento de fluxo abrasivo, ...) e procedimentos de limpeza (pistola de jato, jato de areia...). Contudo não está claro de que forma estes tratamentos afetam as propriedades finais.
- **Qualificação:** uma mudança no método clássico de *qualificação do nível de produto* tem de ser aplicada às peças da AM porque as amostras adjacentes dos ensaios não são totalmente representativas da peça, não existe um processo definido e qualificado, nem metodologias de verificação das peças e a Garantia do Produto tem de ser criada.
- **Análise de Falhas:** os projetos aeroespaciais anteriores abordaram o desenvolvimento das peças da AM que não foram testadas em condições de voo reais ou até em condições representativas. Normalmente, o nível de prontidão tecnológica (TRL) das aplicações pesquisadas é inferior a 4. Por isso, não está claro como se irão comportar as peças da AM em condições de voo reais, nem as fontes potenciais de falha. Isto será feito após a inspeção das peças defeituosas da AM e da sua substituição.
- **O design para desintegração:** no caso dos componentes espaciais, este conceito envolve o design intencional de hardware de sistemas espaciais para que arda completamente / se dê a ablação – durante a reentrada não controlada na atmosfera, como forma de eliminação após a missão. Este conceito está a conduzir à mudança de materiais com pontos de fusão elevados como o titânio ou o aço inoxidável para ligas de alumínio de alta resistência (7XXX series, Al-Li alloys).

Neste quadro, as atividades de investigação Europeias estão atualmente concentradas em estudar o efeito da matéria-prima, dos parâmetros dos processos da AM e das propriedades resultantes dos pós-tratamentos nas peças Aeroespaciais. Também, outro objetivo importante é a definição dos procedimentos de qualificação dos processos e dos fornecedores e a definição dos padrões de manufatura para as peças aeroespaciais da AM.

## Tendências Aeroespaciais para a AM

As tendências atuais no setor aeroespacial estão focadas nas novas estratégias de design para redução do peso dos componentes aeroespaciais, incluindo o design topológico e biônico e as estruturas celulares reticulares [23].

Os conceitos de design das estruturas reticulares celulares e biônicas são motivados pela vontade de colocar o material apenas onde ele é necessário para uma aplicação específica. Do ponto de vista, da engenharia mecânica, uma das principais vantagens oferecida por este tipo de material é a alta resistência acompanhada por uma massa relativamente baixa. Estes materiais podem fornecer boas características de absorção de energia e também boas propriedades de isolamento térmico e acústico. As estruturas celulares exibem uma maior resistência estrutural por peso unitário, comparadas com as estruturas de espuma típicas. Contudo, devido à sua complexidade, é muitas vezes difícil gerar estas estruturas com base nos pacotes de CAD existentes. De igual forma, as tecnologias de manufatura aditiva metálica, tal como o processo PBF-selective laser, demonstram grande capacidade de fabricação de estruturas reticulares celulares resistentes e leves, mas estão ainda a passar por limitações em termos de capacidade geométrica e requisitos de suporte da estrutura [27]–[29].

Como exemplo do desenvolvimento do design otimizado, a Figura 3-6 mostra uma otimização do suporte do conector à peça ACU do lançador espacial VEGA (pertencente à ESA) realizado pela CATEC (Espanha). O processo de evolução inclui a substituição do componente original de 4-peças pela geometria integrada, seguida da otimização convencional e do design biônico da geometria do componente.

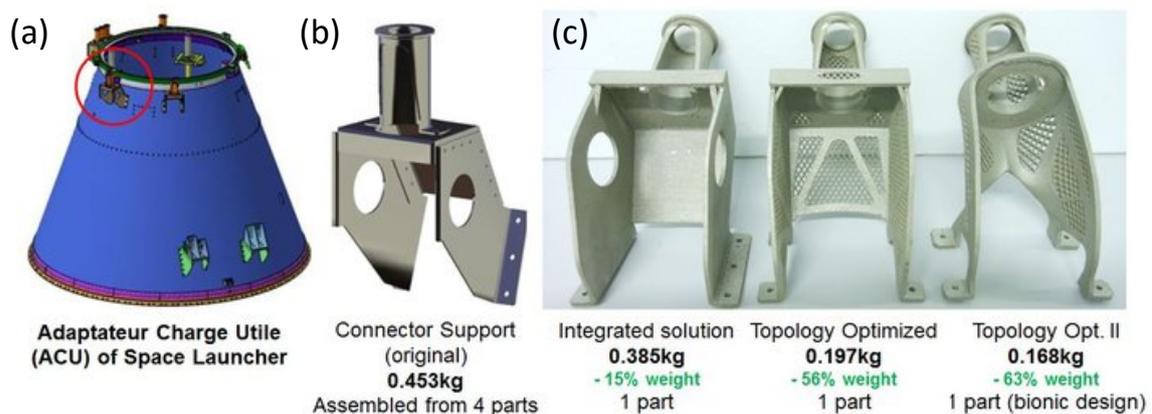


Figura 3-6. Aplicação para o Espaço, desenvolvida pelo D&S da CATEC e AIRBUS: (a) montagem da ACU para o lançador VEGA, (b) suporte original do conector, (c) suportes otimizados: i. manufatura de fase única (montagem integrada), ii. Otimização convencional; e iii. Design biônico

A Figura 3-7 mostra outro componente espacial com otimização topológica, nomeadamente um adaptador do satélite Hipparcos para suporte dos defletores de luz do telescópio.

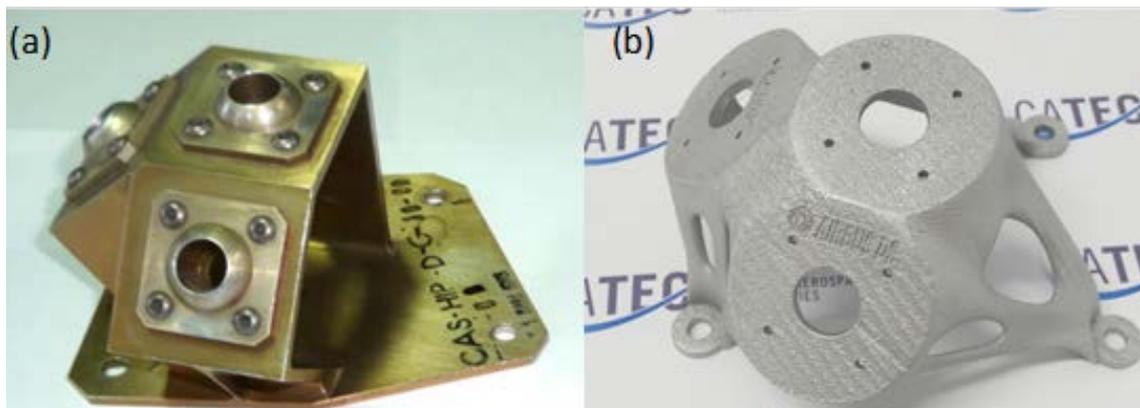


Figura 3-7. Aplicação espacial desenvolvida pelo D&S da CATEC e AIRBUS (a) Suporte original de Hipparcos, (b) Suporte otimizado topologicamente, produzido através da SLM.

Um outro exemplo dum spoiler biónico pode ser observado na Figura 3-8, no qual a estratégia de design é baseada na observação de estruturas da natureza, procurado obter rigidez suficiente para o menor peso do componente [30] [31].

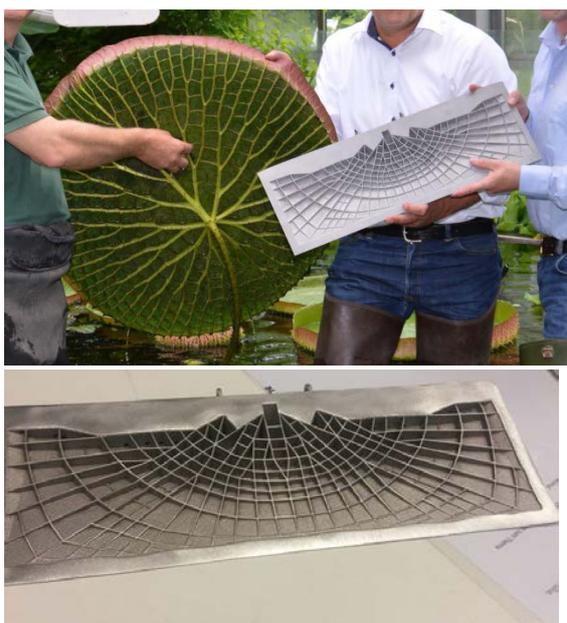


Figura 3-8. Spoiler biónico duma aeronave desenvolvido pela Airbus. O Design é inspirado na estrutura e forma de um nenúfar [30].

Outro exemplo notável a nível mundial e maior componente da cabine de um avião impresso a 3D, foi desenvolvido pela Autodesk e Airbus. Trata-se de uma “partição biónica” separador entre a cabine dos passageiros e a cozinha. O design inovador usado nesse separador imita a estrutura celular orgânica e o crescimento ósseo encontrados nos organismos vivos (ver Figura 3-9). O resultado deste projeto alimenta expectativas uma vez que permite uma partição estruturalmente forte e simultaneamente muito leve, pesando 45% (30 Kg) menos que os atuais designs. Esta partição biónica representa um desenvolvimento pioneiro num setor, para o qual a redução de peso implica uma redução de consumo de combustível. Quando aplicado a toda a cabine e à totalidade das

encomendas em atraso dos aviões A320, a Airbus estima que a nova abordagem de design possa poupar até 465,000 toneladas métricas de emissões de CO<sub>2</sub> por ano.



*Figura 3-9. A partição biônica da Airbus foi exibida na Universidade da Autodesk [30].*

Outra tendência atual de grande relevo para a indústria é a combinação de tecnologia AM com convencional (Manufatura Híbrida), visando a personalização de componentes e redução peso na tecnologia subtrativa, permitindo trabalhar conjuntamente na mesma máquina ou na mesma peça [23], [32], [33]. A Manufatura Híbrida reduz os riscos e os custos associados à adoção da tecnologia de AM metálica, fornecendo aos fabricantes industriais uma alternativa mais pragmática e evolutiva. Embora esta seja uma tendência geral para vários setores, ela é particularmente relevante para o setor aeroespacial tendo em vista a redução de peso dos componentes.

Por fim, e no setor espacial, é de referir a notável linha de investigação seguida pelo Net Shaping Centre na School of Metallurgy and Materials da University of Birmingham (projeto PhotAM financiado pela ESA) [34] o qual visa a colocação de tecnologia AM a bordo da ISS. Com efeito, caso seja necessário reparar componentes no espaço (p.ex. suporte ou dobradiça), essa operação pode ser muito problemática, cara e potencialmente perigosa. Colocando uma impressora AM na International Space Station (ISS) evita que as peças de substituição sejam lançadas da Terra. Este aspeto é da maior relevância para a exploração humana do espaço já que se torna cada vez menos viável enviar “suplentes” de casa. O desenvolvimento da 3D no espaço permitirá aos astronautas resolver problemas de peças defeituosas por manufatura de substituição eficiente, enquanto a atual investigação pode potencialmente significar que algum equipamento poderá ser produzido inteiramente no espaço.

### Exemplos de componentes aeroespaciais em AM

O setor aeroespacial utiliza AM de forma ampla, com muitos exemplos de componentes de nicho a serem produzidos (seja em polímeros ou metais). As aplicações principais de AM no setor aeroespacial são a prototipagem, a moldagem e instrumentação, o fabrico de peças suplentes, a reparação dos componentes existentes e também a manufatura de peças integrais [35].

A AM tem sido amplamente utilizada nas fases iniciais do desenvolvimento de componentes, ou seja na **prototipagem** de peças de teste "mock-ups" (alguns exemplos estão incluídos na Figura 3-10 e Figura 3-11). A prototipagem serve para fornecer especificações para um sistema real ao invés dum teórico. A verificação pelo modelo CAD, assistência visual, modelos de apresentação, dimensionamento, etc. são as utilizações comuns da prototipagem AM. As "mock-ups" físicas em 3D, um termo inicialmente introduzido na indústria aeronáutica, são utilizadas nos ensaios finais das peças.

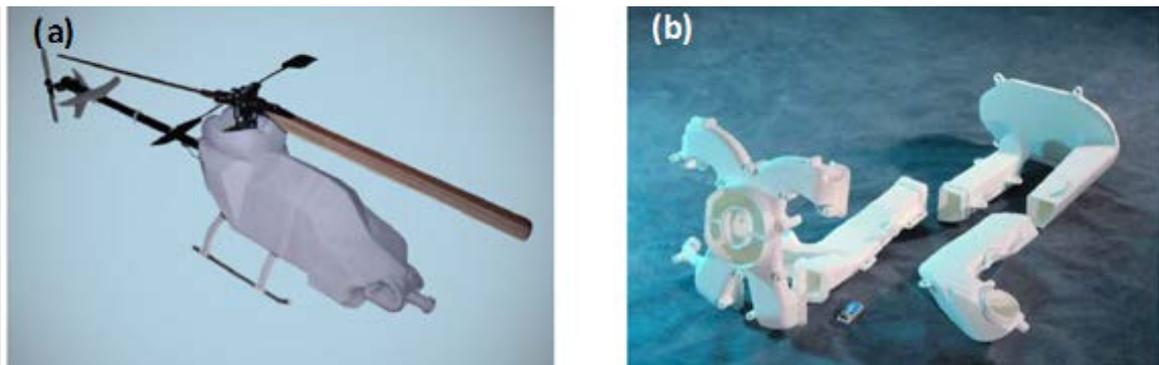
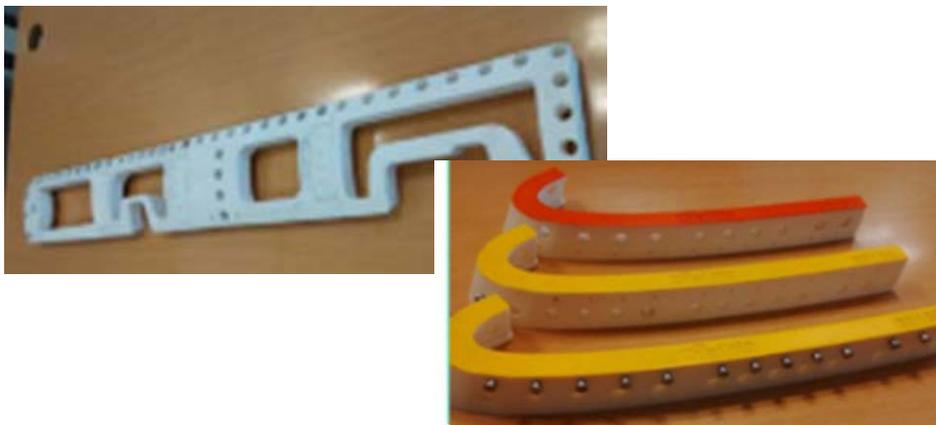


Figura 3-10. (a) Modelo concetual de um helicóptero; (b) Peça de teste para escape de gás" [36].



Figura 3-11. Protótipo manufaturado pela SICNOVA.

Relativamente à **modelação e/ou instrumentação** para a indústria aeroespacial, existe uma vasta gama de componentes. Alguns exemplos estão incluídos na Figura 3-12.



*Figura 3-12. Alguns exemplos de peças industriais para moldagem e instrumentação na aeronáutica fornecidos pela AERNNOVA.*

As tecnologias da Manufatura Aditiva demonstraram uma grande aplicabilidade na **reparação e manufatura de peças suplentes**. As peças suplentes podem ser manufaturadas *por encomenda*, evitando a necessidade de armazenamento. A AM permite ainda que a peça suplente seja produzida exatamente no local pretendido. Por outro lado, a AM é adequada à reparação de peças danificadas, adicionando material apenas onde é necessário. É também notável a capacidade da AM de corrigir funcionalmente uma peça existente, adicionando novas funcionalidades. A reparação AM dá origem a uma enorme redução nos custos e no tempo de produção.

Em termos de **peças finais**, a AM é aplicável em pás de turbinas, peças estruturais para aeronaves não-tripuladas, interiores personalizados para jets comerciais e helicópteros privados, espirais ou injetores de combustível (Morris Technologies), sistemas de descongelamento para para-brisas da AdvaTech, etc. Alguns exemplos estão incluídos na Figura3-13. Hoje, as tecnologias AM podem ser aplicadas à manufatura dos componentes aeroespaciais com elevados graus de complexidade geométrica e com propriedades aerodinâmicas precisas.

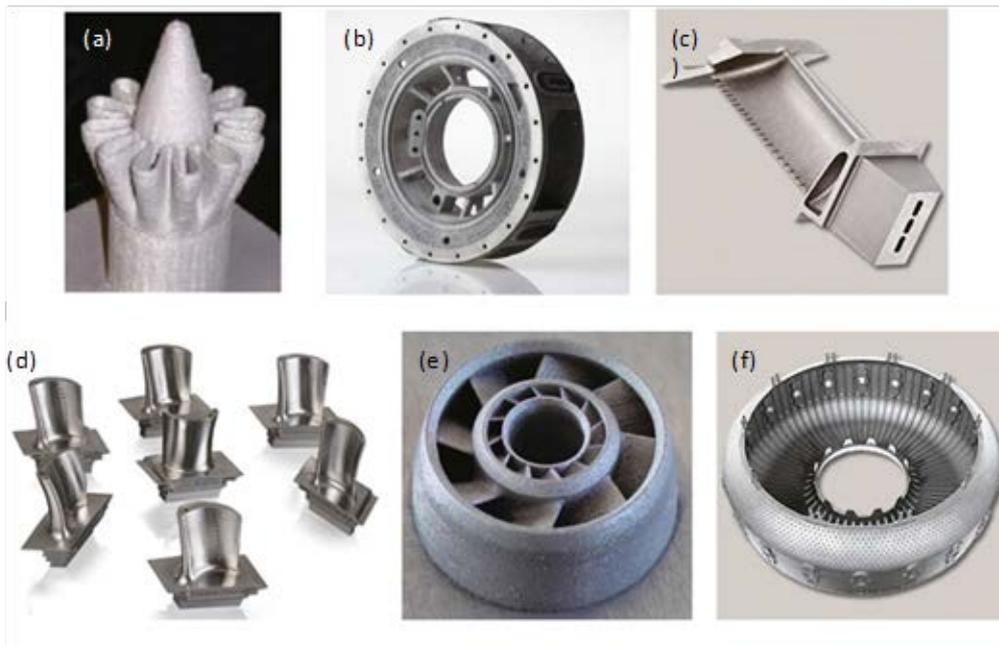


Figura 3-13. (a) Injetor misturador para escape de turbina de gás produzido pela DED-LENS da Optomec, (b) peça de suporte do compressor produzida através de PBF-EBM pela Arcam, (c) pá de turbina produzida através de PBF-SLM pela Concept Laser, (d) pás de turbina fabricadas através de PBF-SLM pela Morris Technologies

No setor **espacial**, foram reconfigurados e manufacturados por tecnologias da AM vários demonstradores, incluindo injetores, propulsores monolíticos, câmaras, bocais, etc. Neste sentido o Grupo AIRBUS desenvolveu recentemente um suporte FLPP ISCAR feito de Ti-6Al-4V para o *Ariane5ME* e 6 lançadores com mais de 30% de poupança no peso. O RUAG Group também desenvolveu um suporte 42% mais leve para o satélite Sentinel 1. Um consórcio liderado pela DMRC desenvolveu um suporte de roda de inércia feito de AlSi10Mg com 56% de poupança de massa e design inovador de topologia otimizada para o projeto *Artes5.1*. A ESA, TESAT e a ILT colaboraram na aplicação da AM ao hardware de radiofrequência como condutor de feixes de onda e antenas. Todos estes projetos demonstraram as possibilidades das tecnologias da AM nas estruturas secundárias e nas peças não-críticas. Como exemplo relativo ao desenvolvimento das estruturas secundárias, na Figura 3-14 está incluído um desenvolvimento do D&S da Airbus para o satélite EUROSTAR3000. Um suporte de telemetria em alumínio foi topologicamente otimizado para se conseguir uma redução da massa de 35% (figura 3-14).

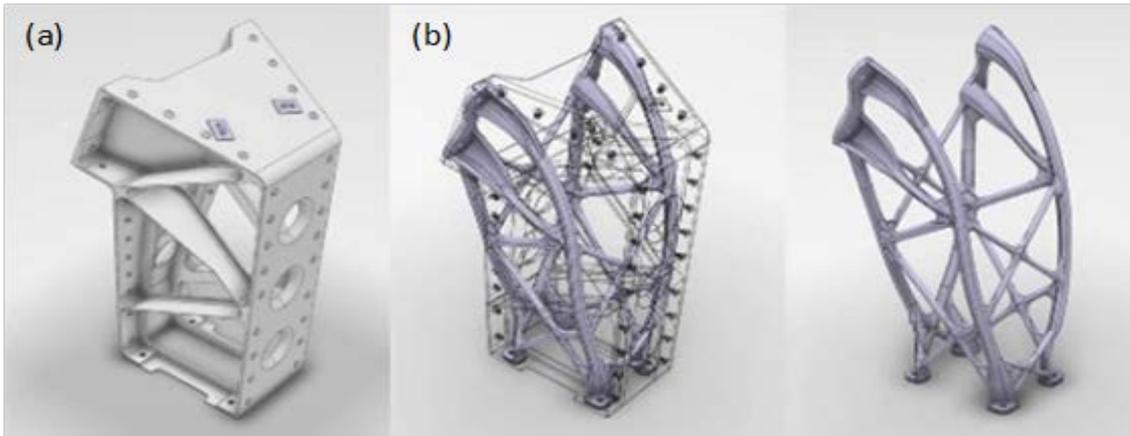


Figura 3-14. Suporte de telemetria produzido em alumínio, aplicação espacial desenvolvida pelo D&S da AIRBUS: (a) versão original; (b) vista do componente otimizado.

Relativamente ao desenvolvimento de estruturas primárias para os lançadores espaciais e satélites, salienta-se o trabalho e os progressos da CATEC (Espanha) em associação com a AIRBUS D&S (Space Systems, Madrid), alguns incluídos na Figura 3-15.

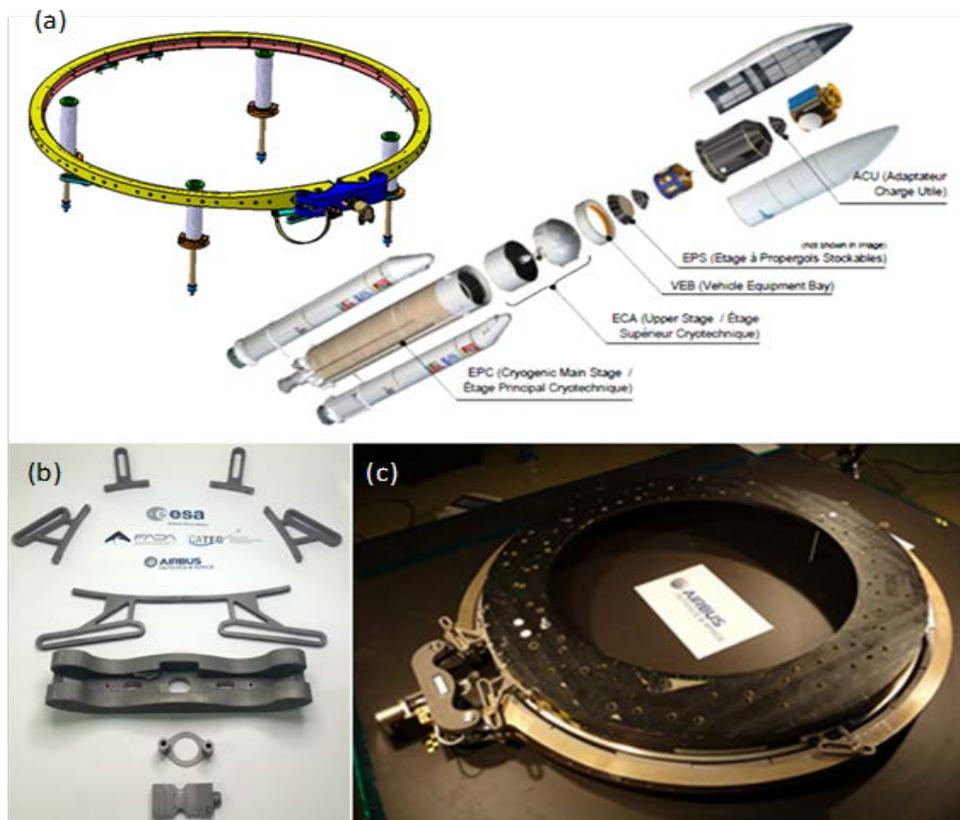


Figura 3-15. Desenvolvimento da estrutura primária do ARIANE5, pela CATEC e pelo D&S da AIRBUS: (a) Vista do LPSS e do lançador ARIANE5 (a faixa está montada com o Adaptador de Carga Útil (ACU)), (b) Componentes da AM manufaturadas através da SLM, (c) Montagem do sistema, ensaio funcional

Neste sentido, os esforços envidados pela Airbus e pela GE Aviation na evolução da AM devem ser salientados. No caso da Airbus, no Wohlers Report 2016 sublinhou o empenho

da Airbus na integração da AM nos processos produtivos, à frente de que qualquer outra OEM. Uma variedade impressionante de projetos exploratórios tem sido conduzida, utilizando a AM na produção de peças de metal e de polímeros, na reparação e na instrumentação. A Airbus também desenvolve métodos avançados de design e otimização topológica para reduzir o material e logo o peso, por vezes, em mais de 50%. Por outro lado, a GE Aviation está a produzir peças finais com AM metálica para o seu motor LEAP. Até 2020, a empresa espera manufacturar mais de 100.000 peças através da AM para o LEAP e outros motores de aeronaves [1].

### 3.6 Os principais intervenientes da MAM na SUDOE

O quadro 3.3 abaixo compila a maior parte da capacidade tecnológica da Manufatura Aditiva Metálica da SUDOE, desde centros de pesquisa, fabricantes, clientes e revendedores de valor acrescentado.

*Quadro 3-2. Lista dos principais intervenientes na Manufatura Aditiva Metálica na região SUDOE*

4	Nome	5	Tipo	6	Atividade / descrição	7	País	8	website
	<b>ACITURRI</b>		Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1		Fornecedor Tier 1 de montagem de estruturas de aeronaves e Fornecedor Tier 2 de componentes de motores		ESPAÑA		<a href="http://www.aciturri.com">www.aciturri.com</a>
	<b>AD Industrie</b>		Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1		AD INDUSTRIE é um grupo industrial especializado em engenharia mecânica e hidráulica. Estudo, montagem e ensaios do equipamento. Industrialização e produção de peças complexas, materiais metálicos e compostos, caixa de velocidades e transmissões, EDM, tratamentos a quente, soldadura, ligação, deposição por plasma, análise magnética, sangramento, rádio, ultrassom).		FRANÇA		<a href="http://www.adgroupe.com/">http://www.adgroupe.com/</a>
	<b>AIRBUS</b>		Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1		Fabricante aeronáutico europeu		FRANÇA		<a href="http://www.airbus.com/fr/">http://www.airbus.com/fr/</a>
	<b>AKKA Technologies</b>		Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1		Grupo de Engenharia Tecnológica e Consultoria		FRANÇA		<a href="https://www.akkatechnologies.com/fr">https://www.akkatechnologies.com/fr</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>AIRBUS SAFRAN Launchers</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Desenvolvimento e produção dos veículos de lançamento Ariane 5 e Ariane 6. R&D para futuros programas de lançamento Europeus. Responsável pelo sistema balístico do míssil das Forças Armadas da Marinha Francesa: Desenvolvimento, produção e serviços de manutenção para os vários componentes.	FRANÇA	<a href="https://www.airbusafranca.com/launchers.com/fr">https://www.airbusafranca.com/launchers.com/fr</a>
<b>ALESTIS</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	ALESTIS líder aeroespacial na fibra de carbono e tecnologias de compósitos. Responsabilidade pelo design, desenvolvimento, certificação, manufatura e apoio de estruturas aéreas complexas em fibra de carbono. Envolvida em diversos programas MAM.	ESPAÑA	<a href="http://www.alestis.aero">www.alestis.aero</a>
<b>ASSYSTEM France</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Engenharia inovadora e consultoria	FRANÇA	<a href="http://www.asystem.com/">http://www.asystem.com/</a>
<b>ATR</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Manufatura Avançada de Turboélices	FRANÇA	<a href="http://www.ATRaircraft.com/">http://www.ATRaircraft.com/</a>
<b>DASSAULT Aviation</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Design, produção, manufatura e apoio à aviação civis e militar.	FRANÇA	<a href="http://www.dassault-aviation.com/fr/">http://www.dassault-aviation.com/fr/</a>
<b>FIGEAC AERO</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Parceiro de primeira categoria dos maiores fabricantes aeroespaciais, montagem aeronáutica (maquinação e montagem), Peças estruturais, Peças de motores, Peças de precisão.	FRANÇA	<a href="http://www.figeac-aero.com/">http://www.figeac-aero.com/</a>
<b>Fusia</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Manufatura de peças de precisão para a aeronáutica, espacial, defesa	FRANÇA	<a href="https://www.fusia.fr/">https://www.fusia.fr/</a>
<b>ITP</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	ITP é atualmente a nona maior empresa de motores de aeronaves e de componentes no mundo por receitas.	ESPAÑA	<a href="http://www.itp.es">http://www.itp.es</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>LATECOERE</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Um interveniente importante na indústria aeroespacial, o Grupo Latécoère está ativo nos campos das aeroestruturas e sistemas de interconexão através de fases de definição, industrialização, manufatura e instalação. O grupo também realiza atividades de apoio ao produto (reparação, peças suplentes, etc.).	FRANÇA	<a href="http://www.latécoere-group.com/">http://www.latécoere-group.com/</a>
<b>Prismadd</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Fundada em Outubro de 2014 em Montauban, a PRISMADD propõe uma oferta global para cada setor técnico industrial, como o armamento, aeronáutica e o nuclear.	FRANÇA	<a href="http://prismadd.com/">http://prismadd.com/</a>
<b>Rochette Industrie</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Metais – Acabamento, tratamentos a quente, tratamento de superfícies. Revestimentos através de processos físicos. Maquinação de metais, manufatura de montagens mecânicas. Fresagem, torneamento. Processamento de plásticos e Processamento de Maquinação Secundário	FRANÇA	<a href="http://www.mecanicsud.fr/">http://www.mecanicsud.fr/</a>
<b>SAFRAN Group</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	SAFRAN é um grupo de alta tecnologia internacional, fornecedor líder de equipamento aeroespacial, de defesa e segurança.	FRANÇA	<a href="https://www.safiran-group.com/fr/groupe">https://www.safiran-group.com/fr/groupe</a>
<b>SAFRAN Helicopter ENGINES</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Faz o design, manufatura, vendas e apoio de turbinas para helicópteros.	FRANÇA	<a href="https://www.safiran-group.com/fr/societe/safiran-helicopter-engines">https://www.safiran-group.com/fr/societe/safiran-helicopter-engines</a>
<b>AEROSOFT France</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Especializada em sistemas e engenharia de estruturas e layout de cabines	FRANÇA	<a href="http://www.aerosoft.it/">http://www.aerosoft.it/</a>
<b>CAETANO Aeronautic</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Faz o design, produz e manufatura peças para a aviação civil e militar.	PORTUGAL	<a href="http://www.caetanoaeronautic.pt">http://www.caetanoaeronautic.pt</a>

---

<b>ELEMCA</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Laboratório de ensaios, análises e perícia independente CND + Metalurgia.	FRANÇA	<a href="https://elemca.com/">https://elemca.com/</a>
---------------	---	---	--------	---

---

<b>Nome</b>	<b>Tipo</b>	<b>Atividade / descrição</b>	<b>País</b>	<b>website</b>
<b>LAUAK Portuguesa</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	Faz o design, produz e manufatura peças para a aviação civil e militar.	PORTUGAL	<a href="http://www.groupe-lauak.com/">http://www.groupe-lauak.com/</a>
<b>SOGECLAIR Aerospace</b>	Empresa aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	SOGECLAIR é responsável por projetos de estudos de grande escala, codesenvolvimento de grandes setores industriais e desenvolve simulação inovadora e soluções de realidade virtual.	FRANÇA	<a href="http://sogeclair.com/fr/">http://sogeclair.com/fr/</a>
<b>AIRGRUP</b>	Empresa aeroespacial / integrador	AIRGRUP é uma firma industrial envolvida na manufatura de sistemas de tubagem para aeronáutica. Envolvida em diversos programas MAM.	ESPAÑA	<a href="http://www.airgrup.com">www.airgrup.com</a>
<b>Egile Corporativo</b>	Empresa Aeroespacial / Fornecedor Aeroespacial Tier 1	É uma Corporação Empresarial baseada na Tecnologia que tem a Mecânica de Alta Precisão como a sua competência principal em material, desenvolve Produtos de Valor Acrescentado, Serviços e Soluções para os seus clientes. No setor aeronáutico, a Egile está a desenvolver processos produtivos em novas células de trabalho específico adaptadas à manufatura aditiva enquanto compromisso estratégico do futuro.	ESPAÑA	<a href="http://www.egile.es">www.egile.es</a>
<b>EMBRAER</b>	Integrador Aeroespacial	Faz o design, produz, e manufatura peças para a aviação civil e militar.	PORTUGAL	<a href="http://www.embraer.com">www.embraer.com</a>
<b>STELIA (Airbus Group)</b>	Integrador Aeroespacial	STELIA Aerospace oferece soluções globais para fabricantes aeronáuticos e linhas aéreas.	FRANÇA	<a href="http://www.stelia-aerospace.com/">http://www.stelia-aerospace.com/</a>
<b>ADDIMAT</b>	Cluster/ associação	A Associação Espanhola de Tecnologias de Fabrico Aditivo e 3D, agrupa todos os intervenientes com interesse em desenvolver e promover a manufatura aditiva e a 3D.	ESPAÑA	<a href="http://www.addimat.es">www.addimat.es</a>
<b>2MA Tech</b>	Consultoria	2MAtech é uma empresa de engenharia e especialista nos campos da mecânica avançada e matérias.	FRANÇA	<a href="http://www.2matech.fr/">http://www.2matech.fr/</a>
<b>3R</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Designer e fabricante de máquinas de ensaios para caracterizarem os materiais e as estruturas.	FRANÇA	<a href="http://www.3r-labo.com/fr/">http://www.3r-labo.com/fr/</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>ADDILAN</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	ADDILAN é uma nova empresa de máquinas de manufatura aditiva fundada no final de 2016, envolvida na manufatura de peças de média e grande dimensão geradas pela tecnologia WAAM.	ESPANHA	<a href="http://www.addilan.com">www.addilan.com</a>
<b>ADIRA – Metal Forming Solutions</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Fornecedor de Equipamento e Soluções, Fabricante de equipamento de corte de metal, baseado na tecnologia laser. Fabricante de impressoras 3D de grande dimensão, combinando a Powder Bed Fusion e a Direct Metal Deposition numa única máquina. A ADITA realiza a maior área de processamento de pó de metal que permite o fabrico para além do volume da câmara.	PORTUGAL	<a href="http://www.adira.pt">http://www.adira.pt</a>
<b>CODI</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Fornecedor de Equipamento e Soluções. Engenharia e desenvolvimento de produto. Manufatura aditiva de peças de polímeros.	PORTUGAL	<a href="http://codi.pt/">http://codi.pt/</a>
<b>IBARMIA</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Com mais de 60 anos de experiência no negócio das máquinas-ferramenta, desenvolveu o seu novo Centro modelo de maquinação ZVH ADD+PROCESS que combina a manufatura aditiva com a maquinação.	ESPANHA	<a href="http://www.ibarmia.com">www.ibarmia.com</a>
<b>KALLISTO</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Empresa especializada na comercialização, integração e implementação do design, análise e sistemas de manufatura rápida e serviços afins para estas tecnologias. Vasta gama de prototipagem 3D e máquinas de rápida manufatura.	FRANCE	<a href="http://www.kallisto.net/">http://www.kallisto.net/</a>
<b>METALLIE D Powder Solutions</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Produtor de Pó de Metal par aos mercados da Manufatura Aditiva	ESPANHA	<a href="http://www.erasteel.com">www.erasteel.com</a>
<b>Micronorma</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Maquinaria para trabalho metálico feita à medida. Design do produto. Fazem atualmente parte dum projeto para desenvolver processos baseados na manufatura aditiva a laser.	PORTUGAL	<a href="http://www.micronorma.pt/">http://www.micronorma.pt/</a>

<b>Nome</b>	<b>Tipo</b>	<b>Atividade / descrição</b>	<b>País</b>	<b>website</b>
<b>PROCUT</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Fabricante e fornecedor de ferramentas de corte com carbonetos, conhecida pelas suas Ferramentas de Corte com Precisão Feitas-à-medida.	PORTUGAL	<a href="http://www.procut.pt">www.procut.pt</a>
<b>Zayer</b>	Fornecedor de equipamento e soluções MAM	Com mais de 60 anos de experiência no fabrico de máquinas de fresar e centros de maquinagem, mantém as suas linhas de investigação em várias configurações híbridas de máquinas que combinam a tecnologia aditiva e subtrativa.	ESPANHA	<a href="http://www.zayer.es">www.zayer.es</a>
<b>ADDIMEN</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Foca as suas atividades no design e manufatura de componentes metálicas funcionais.	ESPANHA	<a href="http://www.addimen.com">www.addimen.com</a>
<b>BBE</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Desenvolvimento de produto, análise e design, Engenharia Assistida por Computador (CAE), Design e Redesign de produtos, prototipagem do fabrico de moldes, metais e sinterização de plásticos.	PORTUGAL	<a href="http://www.bbe.pt/pt/">http://www.bbe.pt/pt/</a>
<b>DIMLASER</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Manufatura Aditiva de peças metálicas. Fornecedor de soluções.	PORTUGAL	<a href="http://www.dimlaser.com">http://www.dimlaser.com</a>
<b>DURIT</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Produz componentes de metal duro baseados na metalurgia de pó	PORTUGAL	<a href="http://www.durit.com/pt/">http://www.durit.com/pt/</a>
<b>EDAETECH</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Desenvolvimento, ensaios e fabrico de protótipos e produção de séries pequenas de componentes metálicos, em especial para a indústria automóvel.	PORTUGAL	<a href="http://www.edaetech.pt/">http://www.edaetech.pt/</a>
<b>GNC LASER</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	A GNC Laser oferece endurecimento, soldadura e serviços de manufatura aditiva baseados na tecnologia laser.	ESPANHA	<a href="http://www.gnclaser.es">www.gnclaser.es</a>
<b>I3D CONCEPT</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Gestão de projetos MAM: Processamento de ficheiros digitais, fabrico de peças (protótipos e séries), Pós-tratamento e Caracterização.	FRANÇA	<a href="http://www.i3dconcept.fr/">http://www.i3dconcept.fr/</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>IBEROMOL DES Group</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Engenharia e Fornecedor de Soluções. Conceção de Apoio e fases de desenvolvimento do produto, incluindo as tecnologias de vanguarda de prototipagem rápida e soluções de manufatura rápida para uma vasta gama de aplicações numa grande variedade de materiais.	PORTUGAL	<a href="http://www.iberomol-des.pt/">http://www.iberomol-des.pt/</a>
<b>INDRAERO / Ebas Group</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Design, manufatura e acessórios de montagem para a indústria aeroespacial. Com uma vasta experiência nos plásticos, metais, têxteis, espumas e materiais de borracha. Capacidades nas tecnologias MAM baseadas em revestimentos (DED Directed Energy Deposition)	ESPANHA	<a href="http://ebasgroup.com/">http://ebasgroup.com/</a>
<b>MIZAR</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	A Mizar oferece um serviço especializado no design e produção de todos os tipos de componentes personalizados.	ESPANHA	<a href="http://www.mizar-additive.com">www.mizar-additive.com</a>
<b>GNC LASER</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	GNC Laser oferece endurecimento, soldadura e serviços de manufatura aditiva baseados na tecnologia a laser.	ESPANHA	<a href="http://www.gnclaser.es">www.gnclaser.es</a>
<b>I3D CONCEPT</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Gestão de projetos MAM: Processamento de ficheiros digitais, fabrico de peças (protótipos e séries), Pós-tratamento e Caracterização.	FRANÇA	<a href="http://www.i3dconcept.fr/">http://www.i3dconcept.fr/</a>
<b>IBEROMOL DES Group</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Engenharia e Fornecedor de Soluções. Conceção de Apoio e fases de desenvolvimento do produto, incluindo as tecnologias de vanguarda de prototipagem rápida e soluções de manufatura rápida para uma vasta gama de aplicações numa grande variedade de materiais.	PORTUGAL	<a href="http://www.iberomol-des.pt/">http://www.iberomol-des.pt/</a>
<b>INDRAERO / Ebas Group</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Design, manufatura e acessórios de montagem para a indústria aeroespacial. Com uma vasta experiência nos plásticos, metais, têxteis, espumas e materiais de borracha. Capacidades nas tecnologias MAM baseadas em revestimentos (DED Directed Energy Deposition)	ESPANHA	<a href="http://ebasgroup.com/">http://ebasgroup.com/</a>
<b>MIZAR</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	A Mizar oferece um serviço especializado no design e produção de todos os tipos de componentes personalizados.	ESPANHA	<a href="http://www.mizar-additive.com">www.mizar-additive.com</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>MIZAR Additive Manufacturing</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Empresa especializada no design e produção de qualquer tipo de componente personalizado. Setores Aeroespacial, médico ou industrial em geral.	FRANÇA	<a href="http://mizaradditive.com/fr/">http://mizaradditive.com/fr/</a>
<b>VEROT</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	VEROT, S.A. oferece serviços de transformação de metal, e impressão 3D através da manufatura aditiva metálica.	ESPAÑA	<a href="http://www.verot.com">www.verot.com</a>
<b>LISI Aerospace Additive Manufacturing</b>	Operador ou fabricante de componentes MAM	Componentes e fixações de montagem na indústria aeronáutica.	FRANÇA	<a href="https://www.lisi-group.com/">https://www.lisi-group.com/</a>
<b>PAMI</b>	Organismos Públicos, Programas e Iniciativas relacionadas com MAM & Aeroespaço	Iniciativa Portuguesa na Manufatura Aditiva	PORTUGAL	<a href="http://www.pami.pt">www.pami.pt</a>
<b>TOYAL Europe</b>	Matéria-prima em pó	líder na manufatura de pigmentos de alumínio avançados e pó atomizado.	FRANÇA	<a href="http://toyaleurope.com">http://toyaleurope.com</a>
<b>AIMEN</b>	Investigação & Desenvolvimento	AIMEN e especializada em tecnologias Laser (corte, tratamento de superfícies, revestimentos e manufatura aditiva)	ESPAÑA	<a href="http://www.aimen.es">www.aimen.es</a>
<b>CATEC</b>	Investigação & Desenvolvimento	Um centro tecnológico que tem trabalhado no desenvolvimento das tecnologias da manufatura aditiva desde 2004, com resultados positivos no setor da aeronáutica e espacial, fornecendo soluções às indústrias baseadas na capacidade tecnológica MAM.	ESPAÑA	<a href="http://www.catec.aero">www.catec.aero</a>
<b>CATIM</b>	Investigação & Desenvolvimento	Centro de investigação para a indústria metalomecânica, que realiza serviços de ensaios, controlo de qualidade e metodologia. O CATIM está a criar um projeto para formar os seus membros nas oportunidades oferecidas pela manufatura aditiva metálica.	PORTUGAL	<a href="http://www.catim.eu/en/">http://www.catim.eu/en/</a>
<b>CDRSP - IPL</b>	Investigação & Desenvolvimento	Centro de Investigação da Escola de Engenharia do Instituto Politécnico de Leiria, focado nas aplicações da prototipagem rápida e tecnologia aditiva.	PORTUGAL	<a href="http://cdrsp.ipleiria.pt/">http://cdrsp.ipleiria.pt/</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>CEA CESTA</b>	Investigação & Desenvolvimento	O Centro de Estudos Científicos e Técnicos de Aquitanine (CESTA) tem como missão primária assegurar a arquitetura industrial do armamento das forças armadas.	FRANÇA	<a href="http://www.cea.fr/">http://www.cea.fr/</a>
<b>CEIIA</b>	Investigação & Desenvolvimento	Centro de engenharia focado em soluções de mobilidade de vanguarda. Produção de componentes para a indústria de automóveis e aeronáutica, incluindo a AM de peças de polímeros para soluções de mobilidade inovadoras.	PORTUGAL	<a href="https://www.ceiia.com/">https://www.ceiia.com/</a>
<b>CENTIMFE</b>	Investigação & Desenvolvimento	O CENTIMFE é um instituto público sem fins lucrativos para desenvolver atividades pré-competitivas de captação industrial. Desenvolve projetos com a tecnologia da Manufatura Aditiva.	PORTUGAL	<a href="http://www.centimfe.com">http://www.centimfe.com</a>
<b>CIRIMAT INP</b>	Investigação & Desenvolvimento	Centro Interuniversitário de Investigação & Engenharia de materiais.	FRANÇA	<a href="http://www.cirimat.cnrs.fr/">http://www.cirimat.cnrs.fr/</a>
<b>CNES</b>	Investigação & Desenvolvimento	A CNES, uma instituição pública com carácter industrial e comercial (EPIC), propõe às autoridades públicas a política espacial francesa e implementa-a em 5 áreas estratégicas principais: Ariane, Ciência, Observação, Telecomunicações e Defesa.	FRANÇA	<a href="https://cnes.fr/fr">https://cnes.fr/fr</a>
<b>ESTIA</b>	Investigação & Desenvolvimento	Desenvolvimento de uma nova Plataforma de MAM: ADDIMADOUR. LMD/P machine, CMT, Robótica, compostos, etc.	FRANÇA	<a href="http://www.estia.fr">http://www.estia.fr</a>
<b>IK4-CEIT</b>	Investigação & Desenvolvimento	O CEIT é um centro tecnológico privado, especializado na atomização de pó e tratamentos a quente (HIP).	ESPANHA	<a href="http://www.ceit.es">www.ceit.es</a>
<b>IK4-CIDETEC</b>	Investigação & Desenvolvimento	CIDETEC é um centro de investigação privado, especializado nos tratamentos mecânicos.	ESPANHA	<a href="http://www.cidetec.es">www.cidetec.es</a>
<b>IK4-IDEKO</b>	Investigação & Desenvolvimento	IDEKO é um centro de investigação privado, especializado em LMD.	ESPANHA	<a href="http://www.ideko.es">www.ideko.es</a>

Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website
<b>IK4-LORTEK</b>	Investigação & Desenvolvimento	O LORTEK é um centro tecnológico privado com uma vasta competência nas diferentes tecnologias de Manufatura Aditiva Metálica (SLM, LMD, WAAM) e nos vários NDTs.	ESPAÑA	www.lortek.es
<b>IK4-TEKNIKER</b>	Investigação & Desenvolvimento	A TEKNIKER é um centro de investigação privado especializado em LMD, NDT e monitorização.	ESPAÑA	www.tekniker.es
<b>IK4-VICOMTECH</b>	Investigação & Desenvolvimento	VICOMTECH é um centro tecnológico privado especializado no design de software e soluções de inteligência artificial.	ESPAÑA	www.vicomtech.org
<b>INEGI</b>	Investigação & Desenvolvimento	Instituto de Ciência e Inovação na Engenharia Mecânica e Industrial fazendo a ponte entre a Universidade e a Indústria.	PORTUGAL	http://www.inegi.up.pt/
<b>PRODINTEC</b>	Investigação & Desenvolvimento	PRODINTEC VICOMTECH é um centro tecnológico que tem trabalhado do desenvolvimento da tecnologia de manufatura aditiva desde 2004.	ESPAÑA	www.prodintec.es
<b>TECNALIA</b>	Investigação & Desenvolvimento	TECNALIA, de financiamento privado, é um centro de desenvolvimento aplicado à investigação e tecnologia, especializado na Manufatura Aditiva Metálica	ESPAÑA	www.tecnalia.com
<b>THALES</b>	Investigação & Desenvolvimento	Equipamento e sistemas para: Aeronáutica, Espaço, Transportes Terrestres, Segurança e Defesa.	FRANÇA	https://www.thalesgroup.com/fr
<b>THALES Alenia Space</b>	Investigação & Desenvolvimento	Thales Alenia Space faz o design, integra, ensaia, opera e comercializa sistemas espaciais inovadores.	FRANÇA	https://www.thalesgroup.com/fr/global/
<b>TKNIKA</b>	Investigação & Desenvolvimento	TKNIKA é o Centro Basco de Investigação e Inovação aplicada ao Ensino Vocacional e Formação.	ESPAÑA	www.tknika.eus
<b>UPV</b>	Investigação & Desenvolvimento	A Universidade do País Basco (UPV/EHU), particularmente o Grupo de Manufatura de Elevado Desempenho do Dept. de Engenharia Mecânica tem investigado os processos de Manufatura Aditiva com materiais metálicos desde 2004.	ESPAÑA	www.ehu.eus/manufacturing
<b>VLM Robotics</b>	Investigação & Desenvolvimento	Gabinete de estudos em Robótica + Desenvolvimento da MAM	FRANÇA	http://vlm-robotics.fr/
Nome	Tipo	Atividade / descrição	País	website

<b>Ecole des Mines D'Albi Carmaux</b>	Investigação & Desenvolvimento	Escola Secundária (Engenharia) + Laboratório de Investigação com a plataforma MIMOSA: Máquina de SLM	FRANÇA	<a href="http://www.mines-albi.fr/">http://www.mines-albi.fr/</a>
<b>IST</b>	Investigação & Desenvolvimento	Escola de Engenharia + Laboratório de investigação + Centro de Investigação	PORTUGAL	<a href="http://www.tecnico.ulisboa.pt">www.tecnico.ulisboa.pt</a>
<b>REDIT</b>	Investigação & Desenvolvimento	A Rede de Institutos Tecnológicos da Região de Valência é uma associação privada não lucrativa, que foi criada em 2001 pelos Centros Tecnológicos da região em colaboração e com o apoio do Governo Regional.	ESPAÑA	<a href="http://www.redit.es">www.redit.es</a>
<b>IMH</b>	Investigação & Desenvolvimento + Educação	O IMH é um Centro de Formação Único e também um Centro para a Inovação e Serviços de Manufatura Avançada com oferta de equipamento e de formação na MAM.	ESPAÑA	<a href="http://www.imh.es">www.imh.es</a>
<b>Polyshape</b>	Investigação & Desenvolvimento	Poly-Shape é uma empresa inovadora, especializada no design e manufatura rápida de peças de prototipagem funcional e na produção de séries pequenas.	FRANÇA	Research and Development
<b>Pôle formation des industries technologiques</b>	Formação	Formação	FRANÇA	<a href="https://formation.les-industries-technologiques.fr/">https://formation.les-industries-technologiques.fr/</a>
<b>GetReady4 3D</b>	Formação	Formação e transferência de conhecimento sobre manufatura aditiva.	PORTUGAL	<a href="http://www.getready43d.com">http://www.getready43d.com</a>

## 8.1 RESULTADO DO ESTUDO - MAM NO AEROESPACIAL

### Introdução

O consórcio ADDISPACE conduziu um inquérito entre os intervenientes da SUDOE. O mesmo foi respondido por 78 entidades aeroespaciais de França, Espanha e Portugal, nomeadamente, integradores, Tier 1 Aeroespaciais, fornecedores e operadores MAM, organismos públicos, clusters e associações, centros de formação e agentes de investigação e inovação.

O objetivo do inquérito era qualificar e identificar as necessidades dos intervenientes no domínio da Manufatura Aditiva Metálica (MAM) dentro do setor aeroespacial.

### Resultados

De acordo com as respostas, três setores importantes são afetados por esta tecnologia de manufatura: AERONAUTICO, ESPAÇO e DEFESA, o primeiro dos quais com a maioria de 47% das respostas versus 37% e 14% das respostas respetivamente para os restantes dois.

Os inquiridos afirmaram nas suas opiniões que o mercado mundial será dominado em 68% por EMPRESAS LOCALIZADAS NA EUROPA, apesar das posições assumidas por algumas das grandes empresas no sentido de dominar o mercado MAM (exemplos da General Electric, Airbus, Thales Alenia Space, Boeing ou a Thales). Os inquiridos entendem que os GRANDES DESAFIOS estão por resolver, sendo os mais mencionados, a certificação (50%), a manufatura (20%) e a mudança das regras do design (19%).

Contudo, há uma FORTE CONVICÇÃO neste novo processo de manufatura, já que mais de 96% dos inquiridos recomenda que a INDÚSTRIA AERONÁUTICA DEVE INVESTIR nesta tecnologia. Igualmente, a curva em baixo mostra claramente a confiança dos industriais no desenvolvimento, maturidade e dotação da MAM nos próximos anos:

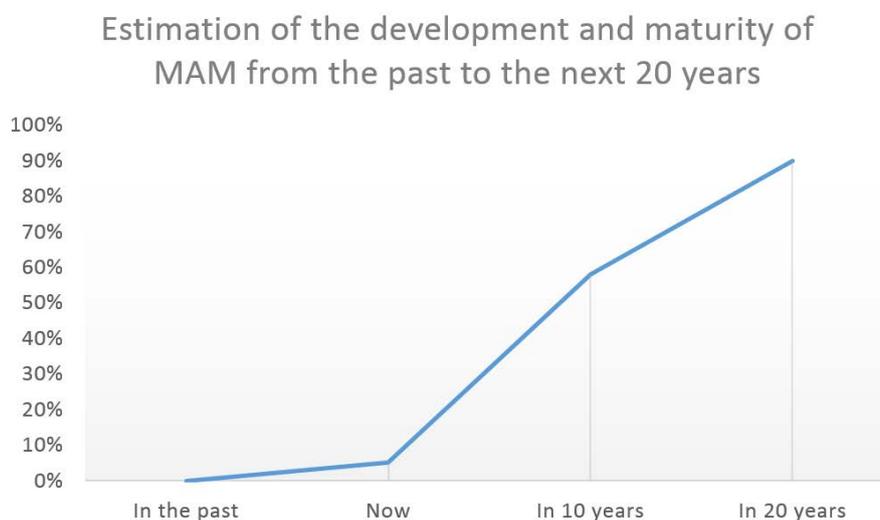


Figura 3-16. Estimativa da evolução no desenvolvimento e maturidade da Manufatura Aditiva Metálica.

Nos próximos 20 anos, e tendo em vista fazer da MAM uma tecnologia standard, confiável e competitiva, é necessário ultrapassar vários obstáculos, nomeadamente o “Alto Custo de Produção” (23%), a “necessidade do pós-tratamento das superfícies” (20%) e o “longo tempo de impressão” (18%). Por último, mas não menos importante, a “Falta de competências e formação” (14%) e as preocupações técnicas com o desempenho mecânico (9%). Um dos resultados interessantes é o “fornecimento dos materiais de base” que mostra um baixo impacto (6%), refletindo certamente o aumento do número de fornecedores a nível mundial.

O inquérito revela ainda que os inquiridos estão a poucos anos de ADOTAR a tecnologia. O resultado mostra que 31% das entidades possuirão EQUIPAMENTO MAM, e destas, a grande maioria (96%) planeia adquirir equipamento em menos de 5 anos. Os equipamentos preferidos e a tecnologia de eleição são a SLM Power Bed fusion (26%), LMD Direct Energy Deposition (17%) e EBM Power Bed fusion e WAAM Direct Energy Deposition (15%).

Relativamente à MANUFATURA INDUSTRIAL 47% dos inquiridos produzirá muito em breve protótipos e, destes, 22% concentrar-se-ão na manufatura de aeronáuticas, 18% motores e 17% peças de fuselagem.

O inquérito permitiu identificar as VANTAGENS E PONTOS FRACOS DA MAM no setor aeroespacial. As cinco principais VANTAGENS pela preferência da MAM sobre os processos da manufatura convencional são a redução da massa, a liberdade do design na conceção das peças, impressão direta to CAD numa só operação em vez da montagem de várias peças, o rácio Buy to Fly é nitidamente favorável à MAM e a produção por encomenda.

Por outro lado, os cinco principais PONTOS FRACOS são a atual dimensão da peça (100cm x 50cm), a necessidade de acabamento devido à rugosidade da superfície das peças imprimidas, a falta de padrões e procedimentos de homologação, a baixa velocidade de fabrico das atuais máquinas e o alto custo dos equipamentos e da matéria-prima.

Foi solicitado aos inquiridos para especificarem as ÁREA DE MELHORAMENTO da MAM. As respostas recolhidas referem-se aos processos, tecnologias, design, matéria-prima e integração com outras tecnologias ou processos, tais como:

- O pós-processamento (acabamento de superfície, remoção do suporte e tratamento a quente), o design da peça e a preparação da máquina foram mencionados por 68% dos inquiridos.
- A matéria-prima é hoje considerada estar bem acima do razoável, quer em termos de qualidade (79%) quer de disponibilidade (57%). O mesmo com a qualidade das peças atualmente produzidas com a MAM, considerada muito acima do razoável (82%).
- Os custos de produção e de inspeção são demasiado altos, de acordo com a maioria dos inquiridos (mais de 56%).
- Atualmente, a legislação obriga a que cada peça produzida por MAM seja examinada e testada. Mas 83% dos inquiridos referem que seria aceitável um

método de inspeção baseado na tomografia por lotes poderia ser utilizado em alternativa. Além disso, os inquiridos privilegiaram os ensaios não-destrutivos baseados na tomografia, ultrassom, termografia e câmaras de infravermelhos em vez do raio-X.

O inquérito sublinhou que as NECESSIDADES DE FORMAÇÃO não devem ser ignoradas, já que quase 59% dos inquiridos crê que a formação atual disponível não preenche as necessidades do seu pessoal envolvido nas atividades de MAM, principalmente Engenheiros Industriais, Engenheiros Eletrotécnicos / Mecânicos e Técnicos ou Operadores. Os inquiridos relataram que deverão aumentar o pessoal afeto a MAM nos próximos anos, principalmente para as atividades de Design e Controlo. Muitas das falhas da formação foram identificadas nas áreas da Otimização Topológica, Processos & Regulamentação, Regras de Design, Controlo Não-Destrutivo e Acabamento de Superfícies.

## Metodologia

Este inquérito esteve disponível online diretamente em [www.addispace.eu](http://www.addispace.eu) e foi também distribuído em Lisboa a 01 Fevereiro 2017 durante um workshop sobre a Manufatura Aditiva e em Albi a 7 Março 2017 no dia da SLM organizado pelo Aerospace Valley.

O inquérito obteve 78 respostas distribuídas da seguinte forma:

- França: 68% de respostas
- Espanha: 22% de respostas
- Portugal: 10% de respostas

Do total dos entrevistados, 32% vinham do setor de Investigação & Desenvolvimento, 28% de empresas de Aeronáutica ou fornecedores Tier 1 da indústria Aeroespacial, 15% de operadores de MAM ou fabricantes de componentes e 25% de outros setores (equipamento MAM, Consultoria, Integradores Aeroespaciais, Formação, Laboratório, etc.).

É igualmente interessante salientar que 20% dos que responderam sentiram que não tinham experiência com a MAM, 32% tinham uma experiência básica, 36% tinham uma boa experiência e 12% consideravam-se especialistas em MAM.

O Relatório Completo do Inquérito sobre a MAM pode ser consultado em anexo a este documento.

## 9 RIS3 POLÍTICAS REGIONAIS DE APOIO À MAM

### 9.1 Introdução

A Comissão Europeia definiu as Key Enabling Technologies (KETs) – Principais Tecnologias Capacitadoras, como as tecnologias de atividades intensivas de conhecimento. As KET's estão associadas à alta intensidade da R&D, bem como a rápidos

ciclos de inovação, a grande dispêndio de capital e a emprego altamente especializado. AS tecnologias de Manufatura Aditiva são normalmente incluídas nas KET's. Neste contexto, a MAM (Metallic Additive Manufacturing) oferece capacidades que podem ser revolucionárias se aplicadas à indústria dos transportes. Por exemplo, este método diminui substancialmente o processamento pois suprime as ferramentas de corte, instalações e processos de construção multi-faseados. Além disso a MAM tem a capacidade de realizar formatos complexos e de trazer ganhos de velocidade do fabrico e de prazos de entrega.

Por outro lado, é extremamente relevante o retorno do investimento proporcionado pelas KETs, mostrando que os investimentos públicos nestes setores geraram valor acrescentado em impostos e em contribuições para a segurança social. Os benefícios podem apresentar um fator multiplicador de quatro vezes o valor de investimento e podem também ter um forte efeito de alavancagem na atualização da competitividade dos negócios, gerar emprego e crescimento da economia.

Nos próximos capítulos visitaremos o apoio das políticas regionais. As três regiões da SUDOE envolvidas no ADDISPACE utilizam a **Research and Innovation Strategy for a Smart Specialization (RIS3) - Estratégia de Investigação e Inovação para uma Especialização Inteligente** - como parte integrante do seu apoio multinível ao desenvolvimento regional das KETs.

## 9.2 A cobertura da região SUDOE

O projeto ADDISPACE dedica-se às tecnologias MAM em toda a região SUDOE, representado no mapa abaixo (Figure 4.1). A região SUDOE cobre a geografia do Sudoeste Europeu, incluindo todas as comunidades autónomas Espanholas (exceto as Ilhas Canárias), as seis regiões do Sul da França e todas as regiões continentais de Portugal, Reino Unido (Gibraltar) e o Principado de Andorra.



Figura 4-1. Mapa 1 da região SUDOE

### 9.3 O RIS3 e as prioridades MAM para SUDOE

Este capítulo foca-se na adequação do eixo RIS3 e nas prioridades de desenvolvimento das atividades da Manufatura Aditiva Metálica na região SUDOE.

País	FRANÇA	Região	NOVA AQUITÂNIA OCCITÂNIA
<b>RIS3 - EIXO E PRIORIDADES</b>			
Nova Aquitânia:			
- Química, industrialização dos materiais e mobilização de biomassa e Bio refinarias para a indústria			
- Laser, fotônica e sistemas de imagiologia			
- Agricultura de precisão e ecoeficiência, agroalimentar			
- Construção ecológica baseada na madeira e eficiência energética dos edifícios			
- Geociências, metrologia/ monitorização para uma gestão sustentável dos recursos naturais			
- Software embebido e objetos conectados			
- Entrega inteligente de bens para a saúde e o bem-estar			
- Circuitos integrados de cuidados de saúde e técnicas de assistência ao doente			
- Mobilidade ecológica e mobilidade inteligente			
- Fábrica competitiva centrada no fator humano			
Occitânia (Languedoc Roussillon - Midi Pyrenees): Todo o alojamento			
- Sistemas incorporados			
- Inovação da cadeia agroalimentar por território			
- Biotecnologias industriais para a recuperação de carbono renovável			
- Materiais e processos avançados: aeronáutica e diversificação			
- Investigação translacional em oncologia e gerontologia			

---

- Engenharia celular e medicina regenerativa

---

#### **VANTAGENS REGIONAIS**

---

- Otimizam a administração e aumentam o apoio das partes interessadas
  - Desenvolvem e implementam estratégias de transformação económica:
    - (A) renovam os setores tradicionais através de atividades de alto valor acrescentado e novos nichos de mercado;
    - (B) modernizam através da adoção e difusão das novas;
    - (C) diversificam tecnologicamente em relação às especializações existentes nos campos relacionados;
    - (D) desenvolvem novas atividades económicas através de mudanças tecnológicas radicais e inovações arrojadas;
    - (E) exploram novas formas de inovação como a inovação aberta e orientada para o utilizador, a inovação social e a inovação nos serviços;
  - Respondem aos desafios económicos e societários;
  - Aumentam a visibilidade dos investidores internacionais;
  - Melhoram os contactos internos e externos duma região;
  - Promovem a difusão do conhecimentos e a diversificação tecnológica.
- 

#### **METAS**

---

A união de materiais e processos avançados na aeronáutica e a diversificação pretendem fazer a interface e a sinergia das competências distribuídas pela região.

As áreas do futuro estão para além do setor aeronáutico.

Com 25 estabelecimentos industriais principais, 150 SMEs de high-tech, 7 projetos para investimentos futuros e uma cultura estabelecida de programas colaborativos de RDI, esta especialização contribui para o reforço e diversificação da economia industrial das regiões. O Projeto ADDISPACE faz parte desta abordagem e pretende desenvolver a disseminação da investigação aplicada às principais indústrias genéricas. Isto para promover competências inovadoras para um crescimento inteligente e sustentável. A implementação de um estudo estratégico regional acerca da AM (apostas por setor, impacto e potencial regional). A restituição planeada para o Lançamento no Outono, dum Estudo sobre formação em AM (necessidades + proposta de oferta)

O grupo de trabalho identificou novas direções para a AM, nomeadamente:

Os agro-materiais / agro-compostos: Identificação de ações estruturais a favor do setor seguindo a estrutura do CRTCI (Composite Transfer and Resource Centre Innovative) em Tarbes

Reciclagem / Valorização: Reflexão em curso para esclarecer as apostas / necessidades do setor

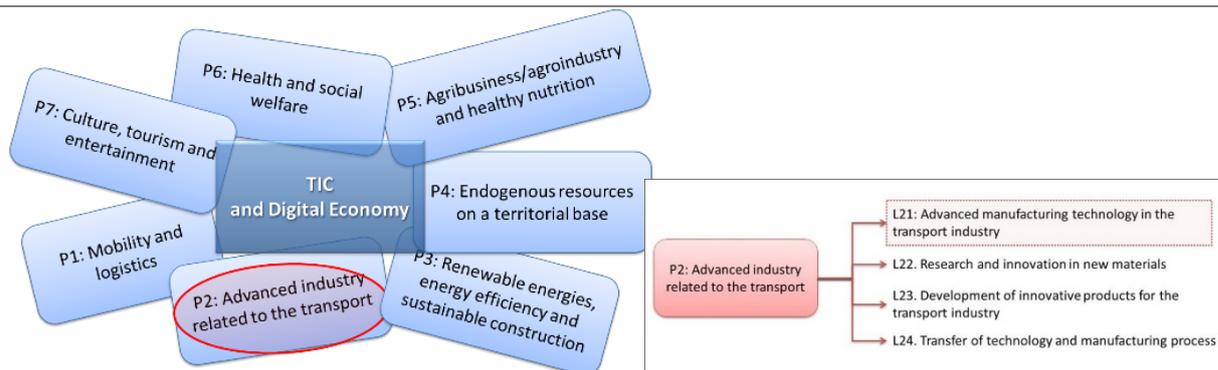
<b>País</b>	<b>ESPAÑA</b>	<b>Região</b>	<b>ANDALUZIA</b>
-------------	---------------	---------------	------------------

#### **RIS3 EIXO E PRIORIDADES**

---

O documento orientador “Visión Andalucía 2020” lista os maiores vetores de inovação, incluindo as dotações de fundos e as competências da Andaluzia no âmbito do atual contexto global e das tendências do futuro.

Oito prioridades de especialização foram selecionadas para a implementação da estratégia proposta de inovação na Andaluzia. (). O Eixo P2(“Indústria avançada para os transportes”) está entre as oito prioridades para a implementação em 4 linhas de ação diferentes (L21-L24), como mostra a figura em baixo, a linha de ação L2 sublinha que as tecnologias MAM podem contribuir para o desenvolvimento de novas metodologias e melhorias nos processos realizados(.) e para que a estratégia Andaluza alcance uma inovação significativa nos processos de produção da indústria dos transportes, dado o seu potencial para aumentar a produtividade nos componentes, peças e sistemas para a indústria aeroespacial e outras (indústria da aviação, indústria naval, indústria ferroviária e indústria automóvel).



## VANTAGENS REGIONAIS

A maioria das atividades de investigação e desenvolvimento das KETs em Espanha estão a ser realizadas na Andaluzia, não só em universidades, mas também em centros de investigação.

A CATEC tem uma vasta experiência de investigação e desenvolvimento das tecnologias AM, nomeadamente na Additive Layer Manufacturing (técnicas (também conhecidas por Rapid Prototyping (RP), Rapid Manufacturing (RM), solid-free form fabrication, digital manufacturing (DM), etc.).

São propostas duas direções principais: 1) Tornar a Andaluzia numa referência mundial da investigação e desenvolvimento, demonstração de tecnologia e 2) Estimular as repercussões noutros setores da economia, promovendo assim o conhecimento e a transferência de tecnologia

## METAS

O Aeroespço e a Defesa são as metas da Andaluzia. As linhas de montagem das empresas de tratores mundiais, como as novas fábricas Europeias de transportes de aviões militares e de fibra de carbono da ADS. Esta linha de trabalho será seguida para melhorar as atuais tecnologias de fabrico avançadas e sistemas. Também será trabalhada a automação, a robotização e a digitalização dos processos produtivos das indústrias de transportes.

Os beneficiários da prioridade P2 (indústria avançada relativa ao transporte) e os grupos-alvo são:

Agentes dos Sistemas de Informação Andaluzes relacionados com a indústria dos transportes.

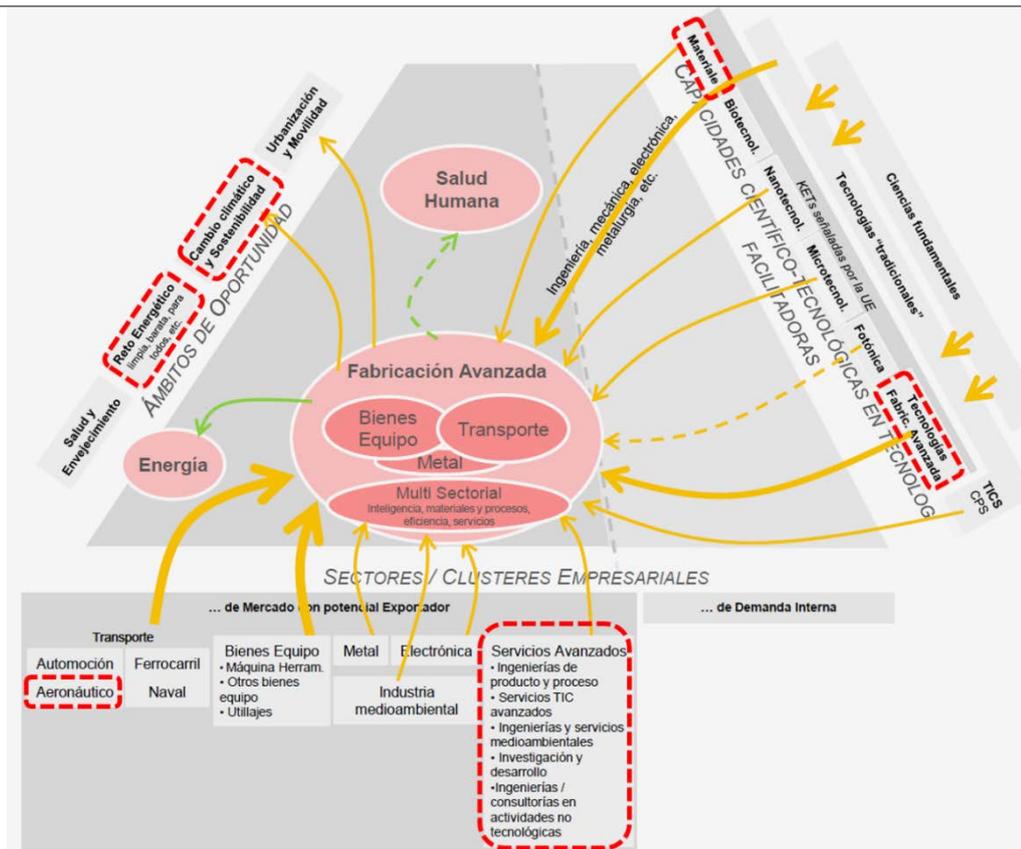
Grupos de investigação das Universidades Andaluzas relacionados com os transportes.

Empresas de transportes industriais.

Empresas de outros setores que apresentem ligações potenciais com a indústria dos transportes.

País	ESPAÑA	Região	PAÍS BASCO
<b>RIS3 EIXO E PRIORIDADES</b>			

Na Estratégia de Investigação e Inovação para a Especialização Inteligente (RIS3) definida pelo Governo Basco, a Manufatura Avançada foi definida como uma das TRÊS META-PRIORIDADES, juntamente com a Energia e a Biociência. É um compromisso fazer investigação centrada na incorporação da inteligência nos meios e sistemas de produção, a utilização das tecnologias emergentes e competências em novos produtos e processos, a eficiência e a sustentabilidade dos recursos usados e a integração de serviços de alto valor acrescentado.



## VANTAGENS REGIONAIS

A escolha da “Manufatura Avançada” como uma Meta-prioridade do País Basco está baseada na sua aplicabilidade transversal, na tradição do mercado industrial Basco, na relativa força dum setor comercial diversificado, bem como na existência de importantes competências científico-tecnológicas em possibilitar as tecnologias associadas às atividades de manufatura.

## METAS

As áreas de especialização do RIS3 relacionadas com o Projeto ADDISPACE com maior potencial de desenvolvimento na Comunidade Autónoma do País Basco:

Desenvolvimento de materiais e processos avançados das MAM para os vários subsectores dos transportes, como o setor aeronáutico.

O desenvolvimento da produção MAM significa, estudar tecnologias escaláveis ao nível da Máquina-Ferramenta (tecnologias LMD, WAAM) e de novos conceitos de máquinas (hibridização do processo), Grupos de investigação das Universidades Andaluzas no âmbito dos transportes.

Empresas de transportes industriais.

Empresas de outros setores que apresentem potenciais ligações com a indústria dos transportes.

País	ESPAÑA	Região	OUTRAS REGIÕES
<b>RIS3 AXIS AND PRIORITIES</b>			

Para além das regiões alvo do País Basco e da Andaluzia, deve salientar-se que um número relevante de outras regiões espanholas considera o setor Aeroespacial e/ ou a Manufatura Aditiva como uma Key Enabling Technology (KET), entre as suas prioridades RIS3.

Por exemplo, as regiões de Madrid, Castela-Leão e Castela e La Mancha consideram o setor aeroespacial

---

dentro das suas prioridades alvo baseado nas capacidades tecnológicas estabelecidas. A região da Galiza também considera este setor uma oportunidade nicho como forma de diversificar o setor tradicional metalomecânico.

O número de regiões Espanholas que abraçaram as tecnologias de manufatura avançada como uma prioridade KET é enorme; de entre as quais, as seguintes consideram as tecnologias de manufatura aditiva nas suas prioridades de especialização: Aragão, Astúrias, Cantábria, Catalunha, Madrid, Navarra e Valência.

---

<b>País</b>	<b>PORTUGAL</b>	<b>Região</b>	<b>CENTRO DE PORTUGAL</b>
-------------	-----------------	---------------	---------------------------

---

### **RIS3 EIXO E PRIORIDADES**

---

Os principais objetivos do RIS3 EM Portugal assentam nos domínios científico e tecnológico onde Portugal tem vantagens comparativas ou competitivas.

A visão do Portugal 2020 está baseada em 4 pilares fundamentais:

Economia digital;

Ciência e criatividade;

Capacidade tecnológica industrial;

Reforço das capacidades endógenas e diferenciadoras.

Em 5 eixos temáticos:

A promoção do potencial de base do conhecimento científico e tecnológico;

A promoção e cooperação entre as instituições de R&D públicas e privadas e entre empresas;

O foco nos bens e serviços de valor acrescentado;

A promoção do empreendedorismo, a promoção da criação de emprego e qualificação dos recursos humanos;

A transição para uma economia de baixo carbono.

A área da MAM (e, portanto, do ADDISPACE) está fortemente alinhada com alguns dos eixos estruturais e prioridades já referidas, uma vez que promove o desenvolvimento e a transferência de conhecimento científico e tecnológico. O ADDISPACE também contribui para a disseminação e cooperação entre as empresas e a investigação e para a criação de clusters de serviços para o aeroespacia com o efeito de alavancagem para a competitividade deste setor de alto valor acrescentado.

O ADDISPACE enquadra-se na plataforma transversal de inovação das "Soluções Industriais Sustentáveis" para as cinco áreas prioritárias: "Automóvel, Aeronáutica e Espacial", "Energia", "Materiais e Matéria-Prima" e "Tecnologias Produtivas" e "Indústria de Produtos".

---

### **VANTAGENS REGIONAIS**

---

O RIS3 para o Centro de Portugal identifica como áreas prioritárias os processos, os materiais e os sistemas sustentáveis de elevado valor acrescentado, aplicados à investigação e ao melhoramento das principais tecnologias, o que permite enquadrar na RIS3 as tecnologias e processos de manufatura aditiva genérica (AM) e de manufatura aditiva metálica (MAM) em particular, bem como a sua integração nos equipamentos e sistemas de manufatura tradicionais.

A estratégia regional (RIS3) também identifica a indústria aeroespacial como um mercado de elevado valor acrescentado, estabelecendo-se assim uma relação forte com o projeto ADDISPACE

O RIS3 para a região também define como prioridades para a região, o desenvolvimento da tecnologia avançada e/ ou dos processos emergentes, produtos inovadores e ecossistemas de alto valor acrescentado.

O desenvolvimento das tecnologias MAM enquadra-se na linha do RIS3 na avaliação dos processos de sustentabilidade.

A utilização das tecnologias MAM com um alto grau de sofisticação permite o fabrico de componentes com um grande valor acrescentado de alta qualidade, num curto período de produção e a redução dos custos de fabrico, com evidentes benefícios na eficiência.

---

### **METAS**

---

Desenvolver as tecnologias MAM por empresas da região do Centro de Portugal, para desenvolver a atividade

---

---

económica local, criar parcerias, fornecer componentes, produtos e serviços. A meta do RIS3 é promover a capacidade exportadora das empresas locais no fornecimento da tecnologia avançada ao mercado aeroespacial e assim contribuir para aumentar a competitividade da região. A adoção das tecnologias da manufatura aditiva pelas empresas da região é uma meta e uma contribuição positiva para a sustentabilidade e eficiência na utilização dos recursos, porque o processo aditivo minimiza a utilização dos processos de corte para a lascagem (tecnologias subtrativas), com a conseqüente redução significativa do desperdício de limalha. Assim, O ADDISPACE enquadra-se nas metas regionais do RIS3 por sustentar o uso eficiente da matéria-prima, a redução do desperdício, bem como, a eficiência energética.

Outra meta do RIS3 é melhorar a capacidade humana através das ações de disseminação e transferência de conhecimento e através de curso de formações-piloto e de reciclagem. As tecnologias de manufatura aditiva e o ADDISPACE são, uma vez mais, fortes colaboradores desta ação prioritária do RIS3.

---

## 10 GLOSSÁRIO

[AM]:	Additive Manufacturing
[MAM]:	Metallic Additive Manufacturing
[LMD]:	Laser Metal Deposition
[LMD-w]:	Laser Metal Deposition-wire
[DMLS]:	Direct Metal Laser Sintering
[SLM]:	Selective Laser Melting
[EBM]:	Electron Beam Melting
[EBAM] <sup>™</sup> :	Electron Beam Freeform Fabrication (EBF <sup>3</sup> )
[WAAM]:	Wire and Arc Additive Manufacturing
[PBF]:	Powder Bed Fusion technologies
[DED]:	Directed Energy Deposition technologies
[R&D]:	Research and Development activities
[RIS3]:	Research and Innovation Strategy for a Smart Specialization
[CAD]:	Computer-Aided-Design
[3D]:	Three Dimensional
[NAMII]:	National Additive Manufacturing Innovation Institute of the United States of America
[USA]:	United States of America
[ASTM]:	American Society for Testing and Materials

[STL]:	STL is the standard file type used by most additive manufacturing systems
[MIG]:	Metal Inert Gas
[TIG]:	Tungsten Inert Gas
[CMT]:	Cold Metal Transfer
[GMAW]:	Gas Metal Arc Welding
[GTAW]:	Gas Tungsten Arc Welding
[PAW]:	Plasma Arc Welding
[FGM]:	Functionally Graded Materials
[CFD]:	Computational Fluid Dynamics tools
[FEM]:	Finite Element Model tools
[METI]:	Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan
[AMCRC]:	Advanced Manufacturing Cooperative Research Center of Australia
[STREAM]:	Structural Engineering Materials through AM programme
[DMRC]:	Direct Manufacturing Research Centre of Germany
[TNO]:	Dutch research institute
[RNPR]:	Portuguese National Network of Rapid Prototyping
[FDM]:	Fused Deposition Modelling
[FCT]:	Foundation for Science and Technology of Portugal
[PAMI]:	Portuguese Additive Manufacturing Initiative
[CDRSP]:	Centre for Rapid and Sustainable Product Development
[EPSRC]:	Engineering and Physical Sciences Research Council of UK
[NDT]:	Non Destructive Technologies
[NASA]:	National Aeronautics and Space Administration of USA
[HIP]:	High Isostatic Pressing
[TRL]:	Technology Readiness Level
[CATEC]:	Centre for Advanced Aerospace Technologies of Sevilla, Spain
[ESA]:	European Space Agency

- [FLPP]: Future Launchers Preparatory Programme of ESA
- [ISCAR]: Internal Rotation and Attitude Control System Bracket for FLPP
- [ACU]: Adapter of Useful Charge for ARIANE
- [OEM]: Original Equipment Manufacturer
- [LEAP]: Leading Edge Aviation Propulsion. High-bypass turbofan engine produced by CFM International
- [KET]: Key Enabling Technologies
- [RP]: Rapid Prototyping
- [RM]: Rapid Manufacturing
- [DM]: Digital Manufacturing
- [CRTCI]: Composite Transfer and Resource Centre Innovative in Tarbes, France

## 11 REFERÊNCIAS

- [1] T. Wohlers and T. Cuffrey, "Wohlers Report 2016. 3D printing and Additive Manufacturing. State of the industry.," *Wohler Assoc.*, 2016.
- [2] "Introduction to Additive Manufacturing Technology. A guide for Designers and Engineers.," Shrewsbury, UK, , 2015.
- [3] "Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report form the EC Workshop on Additive Manufacturing." European Commission, p. 78, 2014.
- [4] J. Scott et al., "Additive Manufacturing: Status and Opportunities," in *Science and Technology Policy Institute*, 2012, pp. 1–29.
- [5] "Hype Cycle for 3D Printing," *Gart. Inc.*, 2014.
- [6] "Additive manufacturing: opportunities and constraints," Royal Academy of Enineering. UK, 2013.
- [7] "F2792-12a: Standard terminology for additive manufacturing technologies," ASTM International, 2013.
- [8] Y. Cadoret, V. Chastand, A. Tezenas, and W. Maia, "Additive Manufacturing in Thales." Paris, 2015.
- [9] J. J. Lewandowski and M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 151–186, 2016.
- [10] R. Sharman, "GKN Aerospace. Additive Manufacturing." GKN Aerospace.
- [11] "Additive Manufacturing. A game changer for the manufacturing industry?" Roland Berger Strategy Consultants, Munich, 2013.
- [12] M. Aliakbari, "Additive Manufacturing: state of the art, capabilities and sample applications with cost analysis.," PhD thesis, KTH, 2012.
- [13] A. Biamino, S., Penna, "Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation.," *Intermetallics*, vol. 19, p. 776, 2011.
- [14] "<https://slm-solutions.com/>," 2016 .
- [15] "<http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melt/>," 2016.
- [16] L. E. Murr, "Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam technologies," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 1–14, 2012.

- [17] L. Xue, "Laser consolidation process for the manufacturing of structural components for advanced robotic mechatronic system," *Proc. 6th Int. Symp. Artif. Intell. Robot. Autom. Sp.*, 2001.
- [18] "<http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/elect>," 2016 .
- [19] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015.
- [20] "WAAM." [Online]. Available: <http://waammat.com/>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [21] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 836, no. March, 2015.
- [22] J. Ding, F. Martina, and S. Williams, "Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements," *1st Met. Mater. Process. Ind. challenges*, no. February, 2015.
- [23] "Additive Manufacturing - Next generation." Roland Berger Strategy Consultants, 2016.
- [24] M. M. Cotteleer, M., Holdowsky J., "3D opportunity for aerospace and defense," *Deloitte University Press*, 2014. .
- [25] M. M. Cotteleer, M., Holdowsky J., "The 3D opportunity primer," *Deloitte Univ. Press*, 2014.
- [26] "<http://www.farinia.com/additive-manufacturing/industrial-3d/can-additive-manufacturing-save-the-aerospace-sector>," 2016.
- [27] M. Tomlin and J. Meyer, "Topology Additive manufacturing technologies optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part," *7th Altair CAE Technol. Conf.* , 2011.
- [28] L. Hao, D. Raymont, C. Yan, A. Hussein, and P. Young, "Design and additive manufacturing of cellular lattice structures," *Innov. Dev. Virtual Phys. Prototyp.*, no. November 2014, pp. 249–254, 2011.
- [29] P. Sanders, "Emerging technologies and Concepts. On the way to Additive Manufacturing." Airbus Group, 2016.
- [30] "<http://www.airbus.com/>," 2016. .
- [31] "<http://www.techworld.com/personal-tech/industrial-3d-printing-transform-aviation-design-says-airbus-innovation-chief-3646683/>," 2016.

- [32] M. Merklein, D. Junker, A. Schaub, and F. Neubauer, "Hybrid additive manufacturing technologies - An analysis regarding potentials and applications," *Phys. Procedia*, vol. 83, pp. 549–559, 2016.
- [33] "<http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-core-applications/hybrid-manufacturing/>," 2016.
- [34] "<http://www.materialstoday.com/additive-manufacturing/news/3d-printing-in-space/>," 2016.
- [35] "La fabricación aditiva llega a la industria aeronáutica y espacial." Addimat, Hegan, Invema, AEI, Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Gov. Esp.), 2016.
- [36] "[www.3dsystems.com](http://www.3dsystems.com/)," 2016.
- [37] J. Shukla, A. Mishra, and R. K. Dwivedi, "Review of Development in 3D Printing and Its Impact on Industrial , Social and Medical," *Amsi 2014*, 2014.
- [38] "<http://journal.hep.com.cn/fme/EN/abstract/abstract4627.shtml#1>," 2016.
- [39] Coykendall, Cotteleer, Holdowsky and Mahto, 3D opportunity in aerospace and defense: Additive manufacturing takes flight, Deloitte University Press, 2014.
- [40] Shawn Kelly, EWI, Metal Additive Manufacturing for Aerospace Markets, 7th International EWI/TWI Aerospace Seminar, Seattle, WA Sept 17-18, 2014.
- [41] Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., & Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21(6), 687-697.
- [42] Ford, Sharon. "Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness" *Journal of International Commerce and Economics*. Published electronically September 2014.
- [43] Wholers, T., & Caffrey, T. (2014). *Wholers Report 2014 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry*. Wholers Associates.
- [44] Deloitte analysis; CSC, 3D printing and the future of manufacturing, 2012.
- [45] <http://www.geaviation.com/company/additive-manufacturing.html>, accessed on November 11, 2015
- [46] <http://generalelectric.tumblr.com/post/61429020156/engineers-at-ge-aviations-additive-development>, accessed on November 11, 2015
- [47] <http://www.suasnews.com/2015/11/39747/aurora-flight-sciences-3d-printed-wing/>, accessed on November 11, 2015
- [48] <http://additivemanufacturina.com/2013/07/22/nasa-industrv-test-3d-printed-rocketis-enaine-iniector/>. accessed on November 11, 2015

- [49] <http://additivemanufacturing.com/2014/10/30/concept-laser-gmbh-a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb/>, accessed on November 11, 2015
- [50] METAL AM - The magazine for the metal additive manufacturing industry, Vol.1 No.1 Spring 2015, published by Inovar Communications Ltd
- [51] <http://www.metal-am.com/news/003141.html>, accessed on November 11, 2015
- [52] [http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/press-releases/Airbus-Group/Financial\\_Communication/2015/03/20150319\\_airbus\\_defence\\_and\\_space\\_3d\\_printing\\_eurostar\\_e3000\\_satellite\\_platform.html](http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/press-releases/Airbus-Group/Financial_Communication/2015/03/20150319_airbus_defence_and_space_3d_printing_eurostar_e3000_satellite_platform.html), accessed on November 11, 2015
- [53] [http://www.designnews.com/author.asp?section\\_id=1392&doc\\_id=274172&itc=dn\\_analysis\\_element&dfpPPParams=ind\\_183,industry\\_aero,industry\\_gov,industry\\_machinery,bid\\_27,aid\\_274172&dfpLayout=blog&dfpPPParams=ind\\_183,industry\\_aero,industry\\_gov,industry\\_machinery,bid\\_27,aid\\_274172&dfpLayout=blog](http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1392&doc_id=274172&itc=dn_analysis_element&dfpPPParams=ind_183,industry_aero,industry_gov,industry_machinery,bid_27,aid_274172&dfpLayout=blog&dfpPPParams=ind_183,industry_aero,industry_gov,industry_machinery,bid_27,aid_274172&dfpLayout=blog), accessed on November 11, 2015
- [54] Jukka Muhonen, Laser Sintering - AM Solutions from EOS to meet changing market demands and opening up future possibilities, Teknologidag Hpgskolen i Gjøvik, 19th of September, 2013
- [55] <https://3dprint.com/1357/worlds-fastest-car-koenigsegg-one1-to-feature-3d-printed-exhaust-tips/>
- [56] The Army's Role in Additive Manufacturing, NCMS, October 2013 Frazier, William E. 2010.
- [57] Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Vision and Roadmap. Paper read at Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Affordable, Durable, and Structurally Efficient Airframes, at Solomons Island, MD.
- [58] M. Shellabear, O. Nyrhila, DMLS - Development History and State Of The Art, 1EOS GmbH Electro Optical Systems, Germany; 2EOS Finland, Finland.
- [59] R. Udroui, Powder Bed Additive manufacturing Systems and its Applications, Academic Journal Of Manufacturing Engineering, Vol. 10, Issue 4/2012.
- [61] [www.eos.info](http://www.eos.info), accessed on November 11, 2015
- [62] E. Herderick, "Additive Manufacturing of Metals: A Review" EWI, Columbus, OH USA Materials Science and Technology (MS&T) 2011
- [63] Kristofer Ek "Additive Manufactured Material" - Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44 STOCKHOLM

- [64] Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010), "Additive Manufacturing Technologies", Springer, London 59
- [65] The government office for science, "The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK," London, 2013.
- [66] European Commission, "Advancing Manufacturing- Advancing Europe-Report of the task force on advanced manufacturing for clean production," Brussels, 2014.
- [67] Wohlers associates, "Wohlers report 2016. 3D printing and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report," 2016.
- [68] R. Berger, "Additive Manufacturing – next generation," 2016
- [69] Bonnín, J.R., Fuchs, E., Vaishav, P., Morgan, M.G, Mendonça, J., "When Risks cannot be seen: regulating uncertainty in emerging technologies," 2015. [70] Ponche R. "Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres". Ecole Centrale de Nantes; 2013.
- [71] Bourell D.L., Leu M.C., Rosen D.W., Beaman J.J. "Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing". 2009.
- [72] Sakly A. "Fabrication additive de pièces à base d'alliages métalliques complexes". Université de Lorraine; 2013.
- [73] Bo Q., Yu-sheng S., Qing-song W., Hai-bo W. "The helix scan strategy applied to the selective laser melting". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 63, 5-8, 631-40, 2012;
- [74] Foroozmehr E., Kovacevic R. "Effect of path planning on the laser powder deposition process : thermal and structural evaluation". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 51, 5-8, 659-69, 2010;
- [75] Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G. "Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 83, 1, 389-405, 2015;
- [76] Kumar A., Roy S. "Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding". Computational Materials Science. 46, 2, 495-506, 2009;
- [77] Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. "3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection: effects of laser pulse shaping on the process". Optics and Lasers in Engineering. 41, 6, 849-67, 2004;
- [78] Cho C., Zhao G., Kwak S.-Y., Kim C.B. "Computational mechanics of laser cladding process". Journal of Materials Processing Technology. 153-154, 494-500, 2004;

- [79] Ghosh S., Choi J. "Three-dimensional transient finite element analysis for residual stresses in the laser aided direct metal/material deposition process". *Journal of Laser Applications*. 17, 3, 144–58, 2005;
- [80] Morville S., Carin M., Muller M., et al. "2D axial-symmetric model for fluid flow and heat transfer in the melting and resolidification of a vertical cylinder". *COMSOL Conference*. Paris; 2010.
- [81] Alimardani M., Toyserkani E., Huissoon J.P., Paul C.P. "On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process: An experimental-numerical investigation". *Optics and Lasers in Engineering*. 47, 11, 1160–8, 2009;
- [82] Fallah V., Alimardani M., Corbin S.F., Khajepour A. "Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition". *Computational Materials Science*. 50, 7, 2124–34, 2011;
- [83] Driessen A.M. "Overhang constraint in topology optimisation for additive manufacturing: a density gradient based approach". *Delft University of Technology*; 2016.
- [84] Takezawa S., Nishiwaki S., Izui K., Yoshimura M. "Structural optimization based on topology optimization techniques using frame elements considering cross-sectional properties". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 34, 1, 41–60, 2007;
- [85] Bendsoe M.P., Sigmund O. "Topology optimization: theory, methods, and applications". *Springer Verlag*; 2003.
- [86] Zegard T., Paulino G.H. "Bridging topology optimization and additive manufacturing". *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 53, 1, 175–92, 2016;
- [87] Brackett D., Ashcroft I., Hague R. "Topology Optimization for Additive Manufacturing". 2011;
- [88] R. Berger, "Marktchancen und Potentiale des Additive Manufacturing Roland Berger analyzed Additive Manufacturing (AM) technologies, focusing on metal structures for clients in engineered products," 2014, no. September.

## Partners



ADDISPACE é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do programa INTERREG SUDOE 2014-2020

[www.addispace.eu](http://www.addispace.eu)