

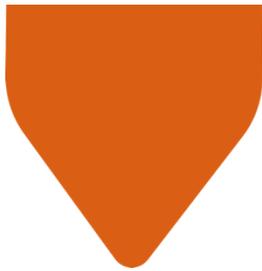
Interreg



Sudoe

ADDITool

European Regional Development Fund



ESTUDO DE OPORTUNIDADES PARA
TECNOLOGIAS DE FABRICO ADITIVO
METÁLICO (MAM) NO SECTOR DAS
FERRAMENTAS

www.additool.eu

Índice

1. INTRODUÇÃO	3
2. OFERTA TECNOLÓGICA DE AM.....	4
2.1. Motivação e Potencial.....	4
2.2. Perspetiva.....	6
2.3. Impacto e oportunidades:.....	11
2.4. A oportunidade do mercado	13
2.5. Tendências do sector de ferramentas em AM.....	14
2.5.1. Maquinação Híbrida	14
2.5.2. Aplicações de processos aditivos e híbridos em ferramentas	18
2.5.3. Optimização de materiais - optimização topológica.....	18
2.5.4. Arrefecimento conformado	19
3. O SECTOR DE FERRAMENTAS.....	23
4. IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES.....	25
4.1. Discriminação dos resultados por país.....	25
4.1.1. Sectores industriais detalhados por país	25
4.1.2. Âmbito de aplicação detalhado das tecnologias MAM.....	25
4.1.3. Materiais detalhados e tecnologias AM.....	26
4.2. Identificação de oportunidades	26
4.2.1. Espanha	27
4.2.2. França	27
4.2.3. Portugal	28
4.3. Selecção de estudos de caso.....	28
5. REFERÊNCIAS.....	30

1. INTRODUÇÃO

Na sequência dos resultados da Atividade 1.1, este documento pretende analisar diferentes aplicações potenciais no sector das ferramentas e é parte da Atividade 1.2 ("Estudo de Oportunidades para as tecnologias MAM no sector das ferramentas").

Será identificado um conjunto de oportunidades para o desenvolvimento e melhoria das atuais tecnologias de fabrico aditivos metálico (MAM) nos sectores industriais, bem como indicações sobre potenciais aplicações inovadoras. Esta atividade é fundamental para a futura definição de estudo de caso.

Tal como afirmado na Atividade 1.1 e na breve descrição do WP, os parceiros trabalharão em estreita colaboração com parceiros locais da sua região na definição dos desafios e oportunidades tecnológicas mais relevantes no âmbito do sector de ferramentas e moldes.

Esta colaboração implicará:

1. O contacto direto com entidades identificadas durante a atividade 1.1, através de reuniões técnicas e visitas às instalações, para avaliar as necessidades particulares de cada empresa.
2. Níveis representativos de informação e identificação das tecnologias de fabrico aditivo metálico com maior impacto para o sector de ferramentas, no futuro.

Estas tendências serão a base para definir o caso estudado na atividade 1.3.

2. OFERTA TECNOLÓGICA DE AM

2.1. Motivação e Potencial

A fabricação aditiva (AM), também conhecida como impressão 3D, permite a fabricação de geometrias complexas, produção remota, redução de peso, alta velocidade, e personalização em massa. A utilização do metal é otimizada na impressão 3D, que utiliza a fabricação camada por camada como princípio. A impressão 3D reduz o custo das despesas gerais necessárias para o fabrico, enquanto reduz significativamente o tempo de fabrico.

Características como a capacidade de fabricar peças leves, maior eficiência na utilização de matérias-primas, a capacidade de produzir objetos com elevada resistência mecânica, maior liberdade de projeto, tempo de produção reduzido, e liberdade de personalização são alguns fatores que encorajam as empresas a investir na tecnologia. Muitas organizações de pequena e média dimensão estão cada vez mais a virar-se para a impressão 3D para o desenvolvimento de produtos personalizados [1].

Os metais são geralmente utilizados na impressão 3D de produtos que requerem alta resistência, estabilidade, resistência química e resistência ao calor. A impressão 3D utiliza metais para o fabrico de vários protótipos, peças sobressalentes e peças funcionais em diversas indústrias, tais como aeroespacial, automóvel, defesa e médica.

Para além destes factos, a AM traz novas metodologias e novas capacidades de produção que até agora eram limitadas pela utilização de processos convencionais de produção subtrativa, abrindo novas fronteiras ao ciclo de vida do equipamento e dos componentes. Isto permite prolongar a vida útil 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 abatidas.

Através da combinação da conceção virtual de produto, incluindo CFD, FEM e outras ferramentas de análise numérica, e da aplicação de princípios de conceção otimizados para AM, é possível explorar o verdadeiro potencial da produção aditiva.

Neste contexto, os principais benefícios do fabrico aditivo em comparação com o fabrico subtrativo seriam os seguintes [2]:

- Não há necessidade de ferramentas, reduzindo assim o tempo de entrada em produção e os custos
- Os pequenos "lotes" de produção são exequíveis e economicamente viáveis;
- Alterações de conceção tornadas fáceis e rápidas de implementar;
- Otimização do produto centrada na função (por exemplo, otimização dos canais de refrigeração);
- A capacidade de produzir geometrias complexas;
- Potencial para simplificar a indústria da cadeia de abastecimento, menores prazos de entrega, menor dimensão de inventário.

À medida que a tecnologia melhora e os processos são aperfeiçoados, o Fabrico Aditivo Metálico tem vindo a tornar-se cada vez mais popular e acessível. Mas mesmo com a descida dos preços das impressoras 3D e a descoberta de novas aplicações para o fabrico aditivo, persistem desafios que impedem muitas empresas de utilizar esta tecnologia inovadora em todo o seu potencial. No seu recente inquérito aos decisores de fabrico - "3D Printing Trends Report" - a Dimensional Research descobriu que 96% dos intervenientes no fabrico enfrentam desafios na impressão 3D - Figura 1.

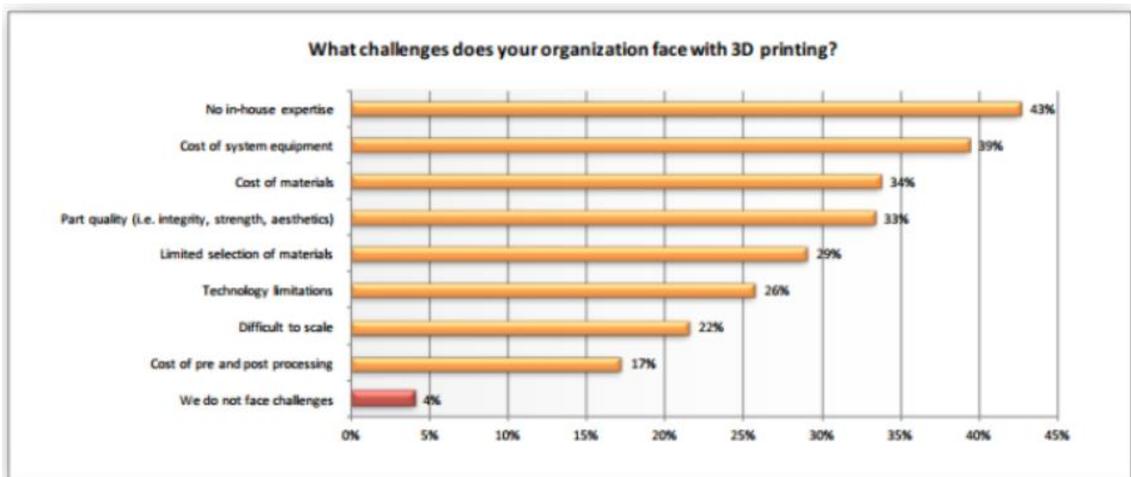


Figura 1. Desafios para o Fabrico Aditivo[03]

Os quatro principais desafios citados pelos inquiridos são: ausência de especialização interna, custo do equipamento do sistema, custo dos materiais e qualidade das peças:

Ausência de conhecimentos especializados internos: Talvez um dos impedimentos mais significativos à utilização da impressão de fabrico aditivo para muitas organizações seja a própria tecnologia. Embora poucas empresas fabricantes questionem os méritos e o valor do fabrico aditivo metálico, muitas carecem de pessoal com a grande variedade de competências e formação necessária para fazer com sucesso peças com impressoras 3D de metal.

Custo do equipamento do sistema: Embora a tecnologia de impressão em metal 3D tenha dado passos significativos ao longo dos últimos anos e o mercado esteja a reunir uma enorme potencial fazendo baixar o custo do equipamento em até 30% em alguns casos, as impressoras ainda não estão acessíveis a 100.000 dólares ou mais. Considerando que cada impressora só pode fazer baixos volumes, são necessárias muitas impressoras para aumentar a produção. Como resultado, o custo continua a ser uma barreira significativa para aqueles que procuram uma solução de fabrico que respeite o orçamento.

Custo dos materiais: Os materiais são frequentemente responsáveis por uma fatia significativa no orçamento de um fabricante. De acordo com a Dimensional Research, os fabricantes de ferramentas são especialmente afetados pelo custo do material e são mais propensos a enfrentar problemas em torno da seleção dos materiais disponíveis.

Qualidade da peça: Nem todos os serviços de impressão em metal 3D e fornecedores de peças são criados de forma igual e, por esta razão, a qualidade das peças continua a ser uma preocupação significativa para os fabricantes. A repetibilidade peça a peça e máquina a máquina é extremamente difícil com DED, DMLS, SLS ou EBM.

Neste contexto, as atividades de investigação europeias estão atualmente centradas no estudo do efeito da matéria-prima, dos parâmetros do processo AM e do pós-processamento nas propriedades resultantes das peças. Além disso, outro objetivo importante é a definição de procedimentos e normas de qualificação de processos e fornecedores para o fabrico de componentes AM.

2.2. Perspetiva

Espera-se que o fabrico em 2050 tenha um aspeto completamente diferente, uma vez que está a passar da produção em massa barata para a produção personalizada, adaptando-se aos mercados globais mutáveis [04][05]. Estas tecnologias permitem uma produção limpa, através da eficiência energética e de gasto de material. Durante os

últimos anos, a indústria AM passou da prototipagem à produção, onde os requisitos de qualidade e complexidade são muito maiores. Depois disso, foi feito um enorme investimento em investigação e comercialização. Muitos fabricantes de equipamento apareceram desde 2015 e esta indústria continuará a avançar de forma impressionante nos próximos anos [06].

A escassez de matérias-primas, a disponibilidade de grandes bases de dados [05] e a tendência de personalização do produto fazem da AM uma alternativa perfeita ao fabrico convencional. A previsão da AM presta atenção a diferentes pontos para melhorar esta tecnologia em termos de tornar viável à escala industrial:

- Produtividade e flexibilidade
- Recolha de dados
- Normalização de qualidade
- Disponibilidade de material
- Equipas multidisciplinares e programas de formação

Recentemente, uma análise da dimensão do mercado de impressão Metal 3D foi realizada pela Polaris Market Research [01] mostrando o potencial da MAM nos próximos anos e dependendo da região –Figura 2.

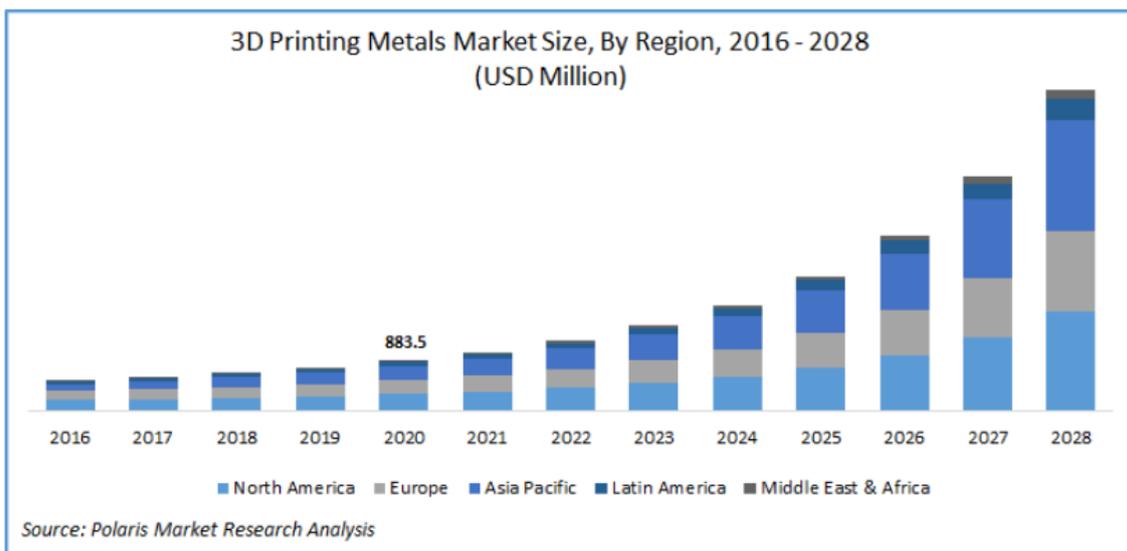


Figura 2. Dimensão do mercado de AM [01].

Os elevados custos do equipamento AM podem ser justificados pela maior velocidade de fabrico, maiores câmaras e facilidade de carga ou descarga de peças, entre outros. Para aumentar a taxa de deposição e a produtividade, as principais soluções estão centradas em diferentes pontos-chave. Como exemplo, estão a ser implementados lasers com maior potência. Também está a ser utilizado equipamento multi-laser com mais de um laser para trabalhar em paralelo ou para seguir diferentes estratégias como estratégias de núcleo-pele que utilizam um laser de alta potência para construir o núcleo e outro com menor potência para construir a pele que necessita de melhor precisão. Os sistemas de matriz de vários feixes montados numa cabeça de processamento tipo impressora com remoção de fumos e gás de proteção local estão também a ser utilizados devido às vantagens como alta velocidade de fabrico e nenhuma limitação do tamanho da câmara. Além disso, o conceito de iluminação completa do leito de pó ou fusão multijacto está na sua fase final de desenvolvimento. Este sistema utiliza agentes químicos para reduzir ou amplificar o processo de fusão conseguindo uma elevada precisão superficial, e máscaras para controlar a radiação laser. Outra opção para reduzir o tempo de processo é a utilização de novos sistemas que tornam possível uma deposição mais rápida do pó ou a realização simultânea de processos de deposição e fusão.

A rugosidade e precisão da superfície podem ser otimizadas por um pós-tratamento como fresagem, polimento e/ou maquinação. Para este fim, as máquinas híbridas integram fabrico aditivo e maquinação, o que aumenta a produtividade e reduz os tempos de espera. Também conceitos de modularização e integração proporcionam flexibilidade combinando e integrando periféricos, câmaras de fabrico maiores, pós-processamento e uma estação automatizada de manuseamento ou descarga que pode reduzir consideravelmente os custos de produção.

A boa qualidade em componentes complexos é difícil de alcançar. Para isso, é importante criar e seguir metodologias para selecionar os parâmetros e estratégias apropriados para diferentes materiais. A integração e a comunicação entre máquinas, para recolha de dados e programas analíticos para a sua gestão, são de grande importância. Além disso, a simulação é uma ferramenta útil para prever e controlar as distorções, tensões residuais e microestruturas, limitando o número de experiências.

No campo dos sistemas de monitorização de controlo, foram desenvolvidas diferentes metodologias para assegurar um processo de fabrico robusto, sem diferenças em termos de qualidade e dimensões entre lotes. O controlo do processo de câmara permite monitorizar 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 de fusão fornece monitorização da temperatura e da forma da zona de fusão em tempo real com a ajuda de sensores de alta resolução. Isto melhora a rastreabilidade, a qualidade, a fiabilidade, a repetibilidade e a eficiência. Existem também programas de software de simulação que preveem a zona de fusão e o comportamento do pó metálico.

Por outro lado, testes não destrutivos (NDT) asseguram a qualidade dos componentes fabricados. Neste campo, a tomografia computadorizada é uma ferramenta útil para detetar a porosidade em geometrias complexas. Devido à juventude da AM para peças metálicas finais, as especificações para inspeção estão ainda a ser desenvolvidas e muitos fabricantes de métodos de inspeção foram recentemente desenvolvidos explorando novas metodologias para a AM [06].

A otimização do desenho da topologia tem de ser melhorada através de software especializado. Os projetistas mudarão a sua metodologia de conceção para uma forma mais funcional e menos de fabrico, dando-lhes mais liberdade para conceber. O software de otimização de topologia permite desenhos otimizados e eficientes com estruturas reticuladas e biónicas, aplicando algoritmos matemáticos. Em estruturas reticuladas, os materiais só são acrescentados às zonas úteis, alcançando estruturas rígidas com otimização do peso, o que reduz o consumo de pó metálico e o tempo de fabrico.

O número de materiais disponíveis continua a crescer. Contudo, é ainda necessário um incremento na escolha dos materiais. Estão a ser feitos desenvolvimentos na processabilidade de novos materiais metálicos como super ligas de Ni, ligas de Al, metais refratários e aços martensíticos, entre outros. A geração de bases de dados das propriedades de materiais específicos a usar por AM e diferentes processos pode fornecer informações para a conceção de novas ligas adequadas para a AM.

A EXMET desenvolveu um processo para a construção de peças metálicas vítreas pela AM. Os metais vítreos combinam de forma única propriedades como alta resistência, elasticidade, dureza, resistência à corrosão, condutividade e biocompatibilidade, todas elas muito úteis para futuras aplicações de alto valor em eletrónica, aeroespacial e engenharia mecânica [68].

Está a surgir um novo processo de fabrico para construir componentes multimaterial para funções específicas. Estes são baseados na transição do material num corpo

durante o processo de fabrico. Têm de demonstrar compatibilidade entre ambos os materiais. Podem ser fabricados em duas câmaras diferentes ou alterando a alimentação através da combinação de 3 materiais diferentes em proporções diferentes.

No campo do fabrico do pó, a tendência é para reduzir o preço dos pós e aumentar a produção de volume de pó. METALYSIS é um novo processo de fabrico de pó utilizando a eletrólise. As suas vantagens são a limpeza, o baixo consumo de energia e a redução de custos de 75 % [07]. No entanto, é necessária uma metodologia para validar o pó fabricado por novas tecnologias. Também é necessário um estudo profundo sobre a influência da reciclagem ou reutilização do pó, mantendo boas propriedades das peças construídas.

As necessidades futuras incluem programas educacionais e de formação, como ponto-chave para fornecer trabalhadores qualificados, bem como a criação de equipas multidisciplinares para desenvolver produtos complexos pela AM [04]. Para o conseguir, a conceção de formação educacional, centrada em técnicas e tecnologia AM de metais, desde o ensino básico até ao secundário, universidade e formação profissional são de grande importância para incluir diferentes papéis e grande número de profissionais qualificados neste campo [06].

Se tivermos em consideração os obstáculos e as alavancas de desenvolvimento AM, os próximos pontos devem ser contemplados:

- Qualificação, padronização e repetibilidade dos processos
 - Falta de fiabilidade e repetibilidade no fabrico de peças. Muitos parâmetros influenciam a produção, e há dificuldade em considerá-los a todos. Surgem fenómenos mecânicos, térmicos, termomecânicos e a sua previsão é uma tarefa difícil.
 - Também devem ser considerados os problemas de baixa repetibilidade das especificações técnicas de um lote de material para outro.
 - Em termos de padronização, estão atualmente a ser escritas normas. Algumas já estão acessíveis, particularmente nas tecnologias de leito de pó, por outro lado, os processos DED ainda estão atrasados.
- Melhoria da combinação velocidade / custo de produção

- O custo de fabrico de peças é ainda demasiado elevado para ser atualmente competitivo na produção em série.
- A adoção de tecnologias de fabrico aditivo só é possível se for encontrado um equilíbrio entre a velocidade de fabrico, o custo de produção e a qualidade do produto acabado.
- Acabamento da superfície e pós-tratamento: O fabrico aditivo atualmente não permite produzir peças com um bom estado de superfície, especialmente para processos DED (Laser Fio, Arco Fio, Laser Pó, etc.)

2.3. Impacto e oportunidades:

A utilização do fabrico aditivo pode alterar profundamente as cadeias de fornecimento e fabrico, historicamente externalizadas e centralizadas. Mesmo se, para muitos produtos padronizados, a produção tradicional em massa permanece e continuará sempre a ser a opção mais vantajosa (pelo menos a curto e médio prazo), as técnicas de fabrico aditivo representam uma grande oportunidade e aplicam-se em particular:

- Peças para suprir roturas de abastecimento
- Peças para as quais a necessidade é limitada, mas para as quais o volume mínimo de encomendas dos fornecedores é elevado
- Peças de baixo consumo que requerem um molde cujo fabrico é lento e caro
- Peças e subsistemas destinados à reparação e manutenção.

Além disso, a identificação adequada das competências e recursos disponíveis nos diferentes territórios é essencial para estabelecer uma cooperação reforçada entre os diferentes atores, o que reduz o custo de acesso a estas tecnologias.

O surgimento de tecnologias de fabrico aditivo convida, assim, a novas iniciativas de colaboração. Estas últimas dizem respeito ao mundo empresarial e às regiões, em particular favorecendo os curto-circuitos e partilhando metodologias e competências de conceção no seio do ecossistema industrial.

A fim de assegurar a manutenção e sustentabilidade destes diferentes ecossistemas, a definição de uma política nacional e regional deve ser uma prioridade, a fim de assegurar

que as questões e iniciativas de cada ecossistema industrial sejam devidamente tidas em conta.

Por outro lado, algumas oportunidades gerais para o MAM são resumidas abaixo:

Prototipagem e experimentação: A tecnologia tem-se desenvolvido principalmente ao longo dos últimos trinta anos. A prototipagem rápida, o fabrico rápido de ferramentas (redução do custo e do tempo de produção de um protótipo que não tem necessariamente uma geometria complexa) ou a validação de pré-séries (graças às ferramentas rápidas em particular) tornaram possível reduzir os tempos de desenvolvimento, aumentar a qualidade do produto e reduzir os custos dos produtos existentes sem alterações na cadeia de abastecimento.

Industrialização da personalização: Os processos MAM abrem caminho a uma maior flexibilidade na configuração da ferramenta de produção. É assim concebível integrar facilmente parâmetros personalizáveis numa cadeia de produção industrial, tornando possível satisfazer necessidades específicas. A implementação industrial do processo abre assim o caminho para novas interações entre o utilizador final e a cadeia de produção, de modo a oferecer a resposta mais adequada a cada necessidade.

Produção em série e ganho de desempenho: a fabricação aditiva tem a vantagem de poder produzir formas complexas (que de outra forma não seria possível fabricar a um custo razoável), ou de integrar funcionalidades adicionais para reduzir as etapas de montagem. Este enfoque estratégico é certamente o mais importante hoje em dia para muitos interessados que querem aumentar a sua capacidade de inovação de produtos. As tecnologias tornam possível, por exemplo, produzir ferramentas complexas a fim de aumentar as taxas de produção ou integrar a eletrónica a partir do fabrico sem transformar a cadeia logística.

Evolução da cadeia de valor: o fabrico aditivo tem um potencial impacto duradouro no fornecimento de materiais ou na gestão de unidades de armazenamento, especialmente no que diz respeito a peças sobressalentes. O interesse do fabrico aditivo não está aqui ligado a uma melhoria do produto, mas sim a um aumento da qualidade do serviço, combinado com uma nova mobilidade das ferramentas de produção. Abrindo caminho a novos modelos económicos, este eixo de desenvolvimento pode ser considerado durante um período mais longo do que os outros, mas combina várias vantagens. Oferece a possibilidade de um ganho de competitividade, um melhor posicionamento

competitivo, ao mesmo tempo que permite a criação de modelos económicos inovadores para a produção tão próximos quanto possível da procura.

O segmento mais promissor no horizonte de 5-8 anos parece ser o do fabrico de ferramentas, na medida em que o atual nível de maturidade da tecnologia permite aumentar o desempenho das linhas de produção num processo de melhoria contínua.

2.4. A oportunidade do mercado

Embora atualmente a maior parte da atividade global do fabrico aditivo incida em sistemas baseados em polímeros, tem havido uma grande atividade e interesse, no que diz respeito também ao fabrico de metais. O fabrico de metais despertou interesse principalmente devido à possibilidade de fabrico direto de componentes "near-net-Shape", e em alguns casos mesmo de componentes finais, sem a necessidade de ferramentas ou maquinaria. Tem havido um interesse particular na indústria aeroespacial, indústria automóvel, especialmente de baixa qualidade, e indústrias biomédicas, devido à possibilidade de produção de componentes de alto desempenho com custo total de produção reduzido. Investigadores e líderes da indústria na União Europeia (UE) identificaram o AM como uma chave tecnológica emergente.

Diferentes países fora da UE têm aumentado a sua sensibilização para a tecnologia AM desde há anos e, neste momento, a América do Norte está na vanguarda quando se trata da adoção da AM. Contudo, a importância dada a estes sistemas e tecnologias tende a alastrar rapidamente a outros países, colocando a AM no centro do desenvolvimento da sua jurisdição nacional. No entanto, a situação dos diferentes países na Europa não é homogénea.

A seleção e utilização de determinado material é fundamentalmente definida pelos requisitos de utilização final, no entanto, é também influenciada pela tecnologia aditiva utilizada.

As diferentes tecnologias de produção aditiva conseguem cobrir a maioria das possibilidades de utilização dos materiais. Desta forma, as super ligas à base de titânio e níquel (por exemplo Inconel) de alta resistência e os aços inoxidáveis são os materiais que mais frequentemente utilizam a produção aditiva – procura-se assim aproveitar o fabrico aditivo para processar materiais caros, que são difíceis de maquinar, procurando colher os benefícios económicos da redução do material utilizado e da redução do tempo de produção dos componentes.

As tecnologias baseadas no laser, feixe de eletrões e arco de plasma podem provavelmente processar a maioria dos metais, mas ainda requerem alguma investigação para assegurar a plena compreensão e domínio de cada um destes processos para cada um dos materiais disponíveis, levando a indústria a concentrar-se no processamento dos materiais que se pretende economicamente mais atrativos pela dificuldade de processamento convencional. Os processos de deposição de material em pó apresentam um enorme potencial, uma vez que podem utilizar múltiplos bicos de deposição de materiais permitindo alterar a composição química do material depositado, dentro da mesma peça, para além de rácios de deposição e diferentes precisões dependendo do tamanho e utilização da peça [08].

2.5. Tendências do sector de ferramentas em AM

As indústrias do sector das ferramentas utilizam principalmente processos subtrativos (denominados corte por arranque de avara, ou apenas maquinagem) para produzir ferramentas, independentemente do seu tipo e aplicação. Isto porque estes garantem a precisão dimensional e o acabamento superficial necessários.

As tecnologias de Fabrico Aditivo, e particularmente a Fabrico Aditivo de Metais, podem desempenhar um papel importante na otimização de vários aspetos desta indústria. No entanto, ainda têm limitações conhecidas relativamente ao acabamento de superfície e às propriedades mecânicas. Por conseguinte, a combinação de fabrico aditivo com processos de fabrico subtrativo tem sido objeto de vários estudos académicos e de investigação, mostrando um aumento significativo na sua utilização num contexto industrial. Esta combinação é chamada de Maquinação Híbrida.

2.5.1. Maquinação Híbrida

A compatibilidade e complementaridade do fabrico aditivo e do fabrico subtrativo implica que eles não precisam e não devem ser mutuamente exclusivos. Para aproveitar todas as sinergias potenciais das tecnologias de fabrico aditivo e subtrativo, as máquinas híbridas, que incorporam tecnologias de controlo numérico computadorizado (CNC) subtrativo e fabrico aditivo, permitem a utilização de ambas nas proporções ideais necessárias para cada caso.

Apesar dos avanços no campo do fabrico aditivo, a sua produtividade é ainda muito mais baixa quando comparada com a maquinação CNC. Este facto incentiva um aumento da produtividade desta tecnologia, o que implica o seguinte dilema: inerente a todos os

métodos de fabrico aditivo planares camada por camada é o compromisso entre o desejo de um acabamento superficial de qualidade sem sacrificar a produtividade e vice-versa, como ilustrado na Figura 3. Este dilema pode ser traduzido na escolha entre "alta velocidade" (alta produtividade) e "baixa velocidade" (acabamento de superfície de alta qualidade), mas nunca os dois ao mesmo tempo.

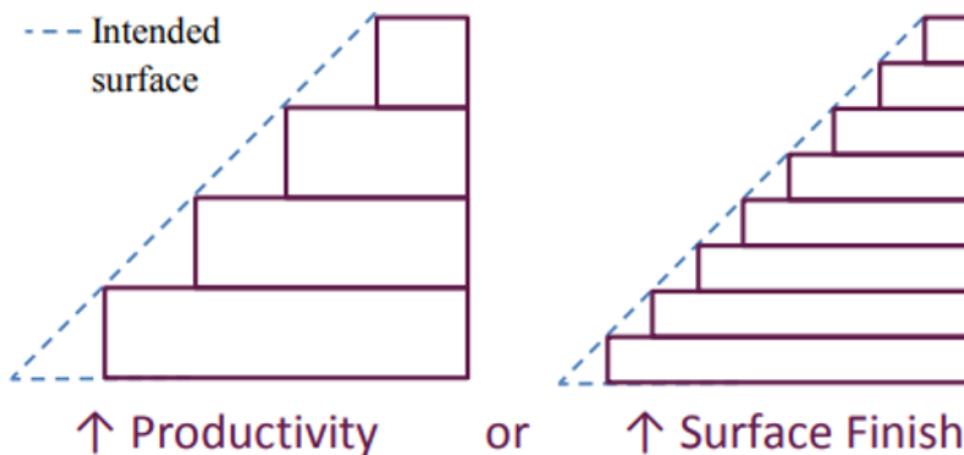


Figura 3. O dilema da produtividade do fabrico aditivo: é melhor ter maior produtividade ou melhor acabamento superficial [01]

A opção de hibridização de máquinas traz uma resposta ao dilema apresentado, combinando deposição por adição com subsequente subtração por maquinagem, controlando assim independentemente as variáveis de produtividade e acabamento superficial, como ilustrado na Figura 4.

A utilização de fabrico aditivo em conjunto com processos de maquinagem é atualmente uma prática padrão para a maioria das peças metálicas produzidas pelo fabrico aditivo para obter o acabamento de superfície desejado.

Contudo, mesmo em resposta ao dilema acima referido requer investimentos substanciais em diferentes máquinas e operadores, pelo que formas adicionais de reforçar as sinergias entre as duas tecnologias têm sido objeto de investigação e desenvolvimento.

Para proporcionar a transferência entre as tecnologias envolvidas, a solução ideal é então incorporar um sistema de deposição diretamente na fresadora CNC, combinando assim a produtividade e a qualidade da superfície resultante da hibridação do processo com a flexibilidade da centralização numa única máquina.

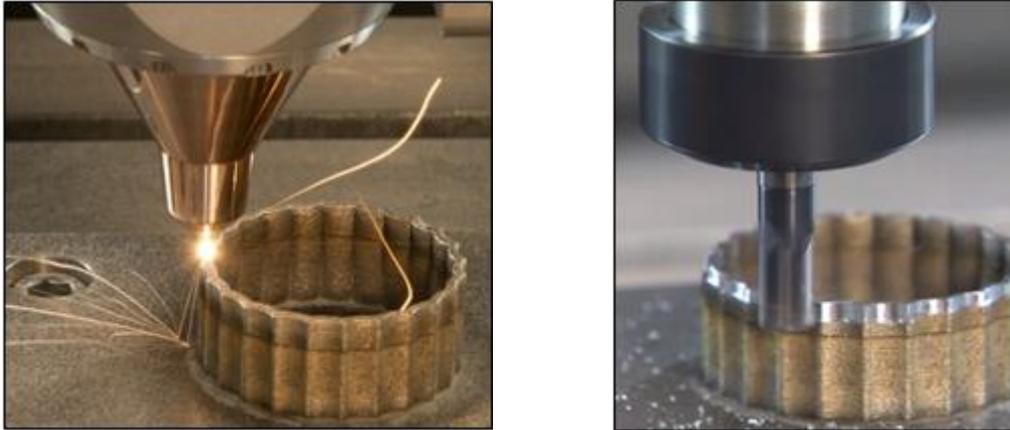


Figura 4. A sinergia entre o processo aditivo e subtrativo [10]

Vários fabricantes de ferramentas já estão a operar no mercado do fabrico aditivo, utilizando tanto tecnologias DED como PBF. Contudo, quando se trata de sistemas de maquinação híbridos, a disponibilidade de máquinas baseadas na tecnologia DED é substancialmente maior quando comparada com as baseadas na tecnologia PBF. A razão para esta maior disponibilidade deve-se à maior taxa de deposição oferecida pela tecnologia DED combinada com a possibilidade de adicionar material às peças existentes. Além disso, dada a viabilidade da deposição enquanto todos os eixos da máquina são interpolados simultaneamente, geometrias complexas podem ser construídas sem a necessidade de estruturas de suporte. Os sistemas híbridos representam assim uma solução viável para reduzir o tempo de fabrico de peças complexas quando comparados com as técnicas convencionais, como mostra a Figura 5.

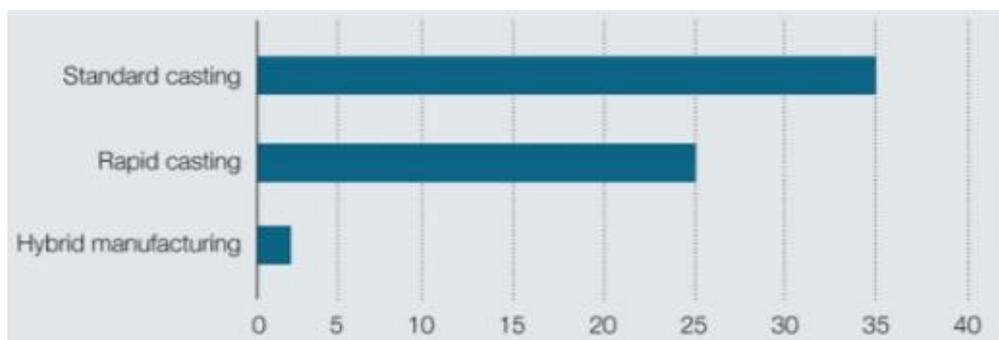


Figura 5. Comparação dos tempos de produção (em dias) das turbinas utilizando diferentes métodos de fabrico [11]

A combinação de processos aditivos e subtrativos numa única "máquina híbrida" é especialmente recomendada quando estão envolvidos materiais de baixa

maquinabilidade, tais como ligas resistentes ao calor e materiais de alta resistência, que são amplamente utilizados nas indústrias aeroespacial, automóvel ou médica.

Os processos de maquinação híbrida têm sido utilizados na remontagem (reparação, modificação e reforma) de componentes existentes com elevado valor acrescentado, como no caso de moldes, bicos ou lâminas de turbina. A Figura 6 esboça as possíveis interações entre o processo aditivo e subtrativo. A hibridação do processo de maquinação também permite obter geometrias únicas que não seriam produtivas utilizando cada processo independentemente, como mostra a Figura 7.

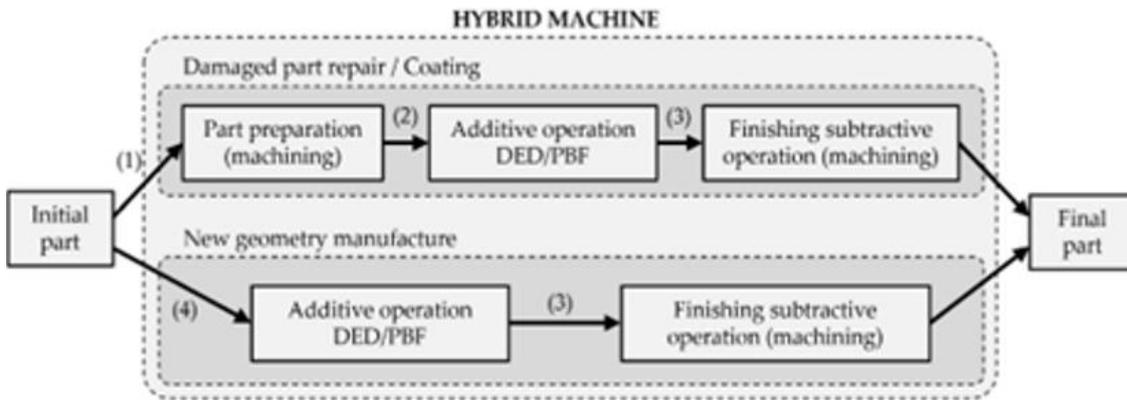


Figura 6. Interações no processo de uma máquina híbrida [11]

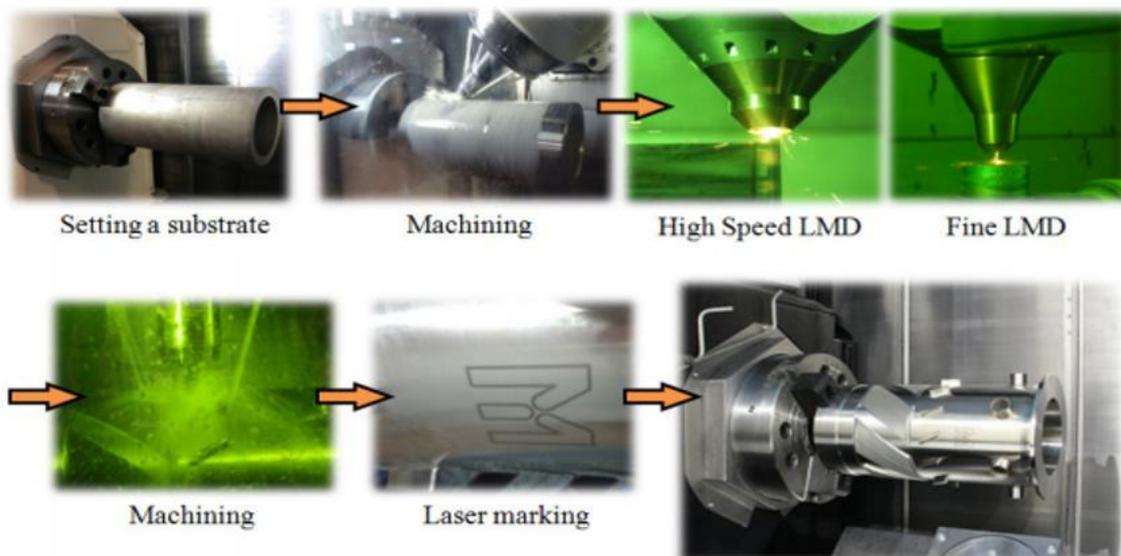


Figura 7. Exemplo de uma sequência de fabrico híbrido [12]

2.5.2. Aplicações de processos aditivos e híbridos em ferramentas

Os tipos de ferramentas que estão agora a colher as vantagens dos processos AM e híbridos incluem:

- moldes, tais como moldes de injeção de plásticos, moldes de fundição injetada, moldes para o fabrico de vidro e moldes para o fabrico de compósitos;
- matrizes para estampagem, tanto a quente como a frio, e matrizes de extrusão;

Estas aplicações beneficiam da utilização de processos AM ou híbridos, principalmente devido a:

- a possibilidade de reduzir a quantidade de materiais gastos na ferramenta, utilizando técnicas de otimização - principalmente utilizando o desenho generativo para obter estruturas treliçadas e otimização da topologia.
- a possibilidade de otimização da função de arrefecimento que faz parte de muitas das ferramentas mencionadas, tais como moldes e matrizes de estampagem a quente, principalmente através da implementação de canais de arrefecimento conformados, mas também através da implementação de estruturas treliçadas internas.

Alguns exemplos dos itens acima referidos vão agora ser apresentados, com base na literatura disponível.

2.5.3. Otimização de materiais - otimização topológica

Casos de otimização topológica podem ser encontrados em moldes de injeção de plásticos, matrizes de estampagem e outros. Asnafi *et al* [13] apresentam exemplos de ferramentas de produção para os dois casos acima referidos. Para as ferramentas de estampagem são apresentados exemplos de moldes em U e punções. Para a geometria da punção estudada - Figura 8 - os autores mostram, através de métodos experimentais e numéricos, que houve uma redução de peso de 34% para o punção concebido convencionalmente (com estrutura alveolar) e 45% no caso da punção com topologia otimizada.



Figura 8. Uma punção industrial: Concebido convencionalmente e impresso em 3D com uma estrutura interna alveolar (esquerda) e impresso em 3D após otimização topológica (direita). Material = DIN 1.2709 em ambos os casos [14].

Asnafi *et al* [15] também apresentaram um caso de uma combinação de puxador/punção para uma ferramenta de estampagem automóvel. A peça foi impressa em 3D para ter uma estrutura de treliça interna e assim remover massa. As peças têm requisitos específicos e, portanto, foi também apresentada uma comparação sobre como esses requisitos são satisfeitos quando se utilizam diferentes tecnologias (Figura 9). Os resultados das peças impressas em 3D são mostrados na Figura 10. O tempo total de fabrico foi reduzido de 8 para 3,7 dias através da utilização da estrutura em treliça otimizada.

2.5.1. Arrefecimento conformado

Os mesmos autores apresentam casos para moldes de injeção [14]. Uma bucha e um inserto para um molde de injeção de plástico foram modificados para ter os seus canais de refrigeração conformados à geometria da peça – Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**. Os resultados mostraram uma diminuição no tempo de ciclo de moldagem, resultando assim num custo mais baixo por peça. Esta redução é suficiente para compensar o aumento dos custos de fabrico da ferramenta.

CONVENTIONAL PROCESS

Punch

Requirements:

- Hardness (after hardening) = 55 HRC
- Surface roughness in the working area = $R_a = 0.8 \mu\text{m}$

Material = SS2263 (tempered)

Process:

- 1: Milling
- 2: Hardening
- 3: Wire EDM

Puller

Requirements:

- Hardness (after hardening) = No requirement
- Surface roughness in the working area = $R_a = 2-3 \mu\text{m}$

Material = SS2172

Process:

- 1: Milling
- 2: Wire EDM

3D METAL PRINTING

Punch

Requirements:

- Hardness (after hardening) = 55 HRC
- Surface roughness in the working area = $R_a = 0.8 \mu\text{m}$

Material = Maraging steel (1.2709)

Process:

- 1: 3D printing of punch and puller
- 2: Post-processing
- 3: Hardening of the punch
- 4: Machining of the working area

Material = Maraging steel (1.2709)

Process:

- 1: 3D printing of punch and puller
- 2: Post-processing
- 3: Hardening of the punch
- 4: Machining of the working area

Figura 9. Os requisitos estabelecidos e os materiais e processos de fabrico para as versões convencionais e impressas em 3D do puxador e punção para a matriz progressiva do arco C na Fig. 10. EDM = Maquinação por Descarga Elétrica. SS = Norma Sueca. A partir de



Figura 10. O puxador e punção impressos em 3D na ferramenta progressiva. Material = DIN 1.2709. A estrutura alveolar tem uma espessura de 1,5 mm na fachada/casca exterior. Adaptado a partir de [15].

Outro exemplo de arrefecimento conformado pode ser encontrado em moldes para estampagem a quente. O processo de estampagem a quente é utilizado para a conformação de aços de ultra-alta resistência e algumas ligas de alumínio, onde a fase de deformação plástica é executada a alta temperatura e uma fase de têmpera é utilizada após a conformação, para produzir as propriedades desejadas nas chapas. É necessária uma taxa de arrefecimento crítica para obter a estrutura adequada no material, e isto implica a necessidade de canais de arrefecimento nas matrizes.

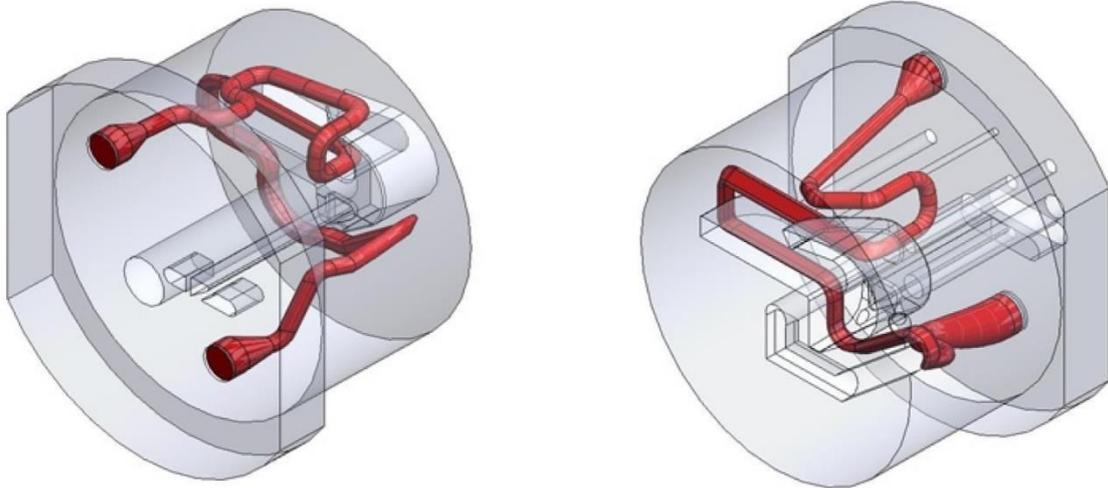


Figura 11. . Bucha / inserto para moldação por injeção otimizados pelas simulações. Cor vermelha = os canais de refrigeração após a otimização. Adaptado a partir de [15].

Vários exemplos de otimização da refrigeração nestas ferramentas podem ser encontrados numa revisão de Chantzis *et al.* [16]. Um exemplo apresentado é o trabalho de Cortina *et al.* [17], onde um canal de refrigeração conformado foi produzido numa matriz de estampagem a quente através de um processo híbrido envolvendo um bloco de aço pré-maquinado para produzir parte do canal de refrigeração, que é depois fechado por LMD - Figura 12.

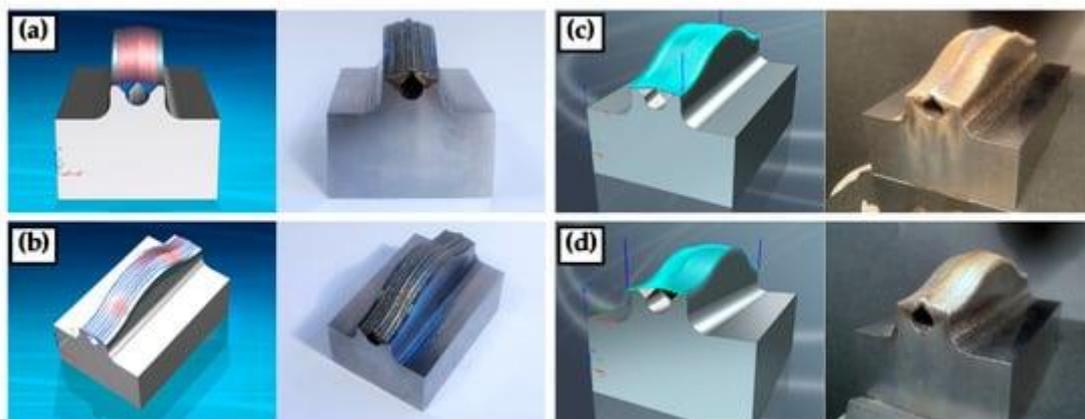


Figura 12. (a) vista frontal; (b) vistas laterais da peça resultante após o LMD; (c) LMD transversal; (d) LMD longitudinal. A partir de [17].

Os resultados mostram uma diminuição da temperatura máxima, e uma melhor distribuição da temperatura na ferramenta, o que contribuiu para melhores propriedades da peça e tempos de ciclo mais baixos -Figura 13.

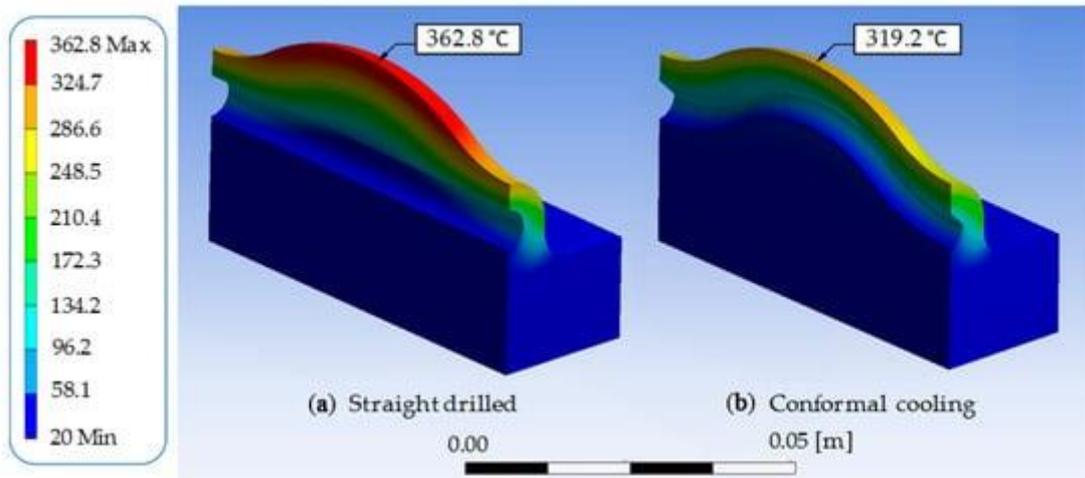


Figura 13. Resultados de simulação térmica de arrefecimento convencional perfurado (a) vs. conformado (b). A partir de [17].

3.0 SECTOR DE FERRAMENTAS

Com base numa análise aprofundada do sector, o consórcio do projeto ADDITool está a realizar um estudo de curto, médio e longo prazo sobre o fabrico aditivo metálico (MAM), determinando com a maior precisão possível as necessidades da indústria de ferramentas e tirando partido da maturidade de todas as tecnologias disponíveis.

Para este efeito, foi realizado um estudo como primeira etapa do WP1 "Identificação de necessidades e definição de casos de aplicação". Os resultados podem ser encontrados no "D1.1.1 Diagnosis_Report_of_MAM_in_tooling_sector" onde o principal objetivo era identificar as necessidades dos intervenientes no domínio do fabrico aditivo metálico (MAM) e dentro do sector de ferramentas.

O inquérito visava tanto o fabricante de ferramentas como o utilizador final de ferramentas. Foi obtido um total de 85 respostas, abrangendo Portugal, França e Espanha. Foi encontrada uma maior participação no inquérito em sectores como o Aeronáutico, Automóvel e Defesa. Além destes, também participaram uma grande diversidade de sectores, tais como Médico, Naval, Educativo, Brinquedos, Sector da Construção, Sector Mineiro e muitos outros.

Relativamente à aplicação do MAM, mas também à utilização de ferramentas em cada empresa, observou-se mais interesse em externalizar o serviço de fabrico do que em adquirir equipamento. Também, mais interesse em fabricar uma peça específica em vez de reparar ou acrescentar novas funcionalidades a uma ferramenta. Além disso, os tipos mais comuns de ferramentas fabricadas (fornecedor) ou utilizadas (utilizador final) de acordo com os resultados do inquérito foram a montagem, moldes para plástico, e ferramentas de maquinaria.

Em relação às tecnologias de fabrico aditivo, a extrusão de material e a fusão em cama de pó foram apresentadas como as tecnologias mais solicitadas.

No entanto, existe uma forte crença neste novo processo de fabrico, uma vez que mais de 96% dos inquiridos recomendam que a indústria de ferramentas de ferramentas invista nesta tecnologia.

Em termos de obstáculos que inibem uma maior implantação do MAM, o investimento inicial foi selecionado como o primeiro obstáculo, seguido dos custos das peças produzidas.

Mais uma vez, em comparação com as tecnologias convencionais, o elevado custo do equipamento e da matéria-prima foram escolhidos como os pontos mais fracos da utilização do MAM.

No que diz respeito aos desafios da utilização do MAM, a certificação e a redução de custos foram consideradas mais difíceis do que a conceção ou o fabrico. Por outro lado, a liberdade na conceção foi selecionada como a maior vantagem da utilização do MAM em relação às tecnologias convencionais.

Em termos de desenvolvimento de conhecimentos, a colaboração com um parceiro externo foi considerada como a modalidade de formação mais adequada para o desenvolvimento de competências, seguida de cursos específicos de curta duração.

A maioria das empresas inquiridas não tem planos para contratar pessoal da MAM (ou não sabe).

4. IDENTIFICAÇÃO DE OPORTUNIDADES

O objetivo deste capítulo é identificar oportunidades para o desenvolvimento futuro das tecnologias MAM no sector de ferramentas, na sequência dos resultados do inquérito. Para fornecer uma base para a seleção de futuros estudos de caso, é necessário reunir contributos sobre necessidades industriais específicas em cada um dos países.

4.1. Discriminação dos resultados por país

4.1.1. Sectores industriais detalhados por país

Relativamente aos sectores industriais por país, o inquérito mostrou uma boa diversidade com uma maior participação da indústria aeronáutica e espacial em França e Espanha, e da indústria automóvel e eletrodomésticos em Portugal.

Detalhando os tipos de ferramentas para os sectores acima mencionados, verificou-se que a montagem, moldes para plástico e ferramentas de maquinaria foram selecionados como os tipos de ferramentas mais comuns, nos três países. Se considerarmos os resultados deste parâmetro por país, podemos observar:

- os moldes para plástico representam a grande maioria dos tipos de ferramentas utilizadas / fabricadas pelos inquiridos portugueses;
- para os inquiridos espanhóis e franceses, as ferramentas de perfuração e os moldes para a conformação de chapas metálicas também reúnem uma percentagem significativa de respostas.

4.1.2. Âmbito de aplicação detalhado das tecnologias MAM

Sobre o âmbito de aplicação das tecnologias MAM - Figura 14 - os três países inquiridos selecionaram como objetivo principal "Fabricar uma parte específica de uma ferramenta, ou uma parte completa em si".

ADDITool survey - Application scope

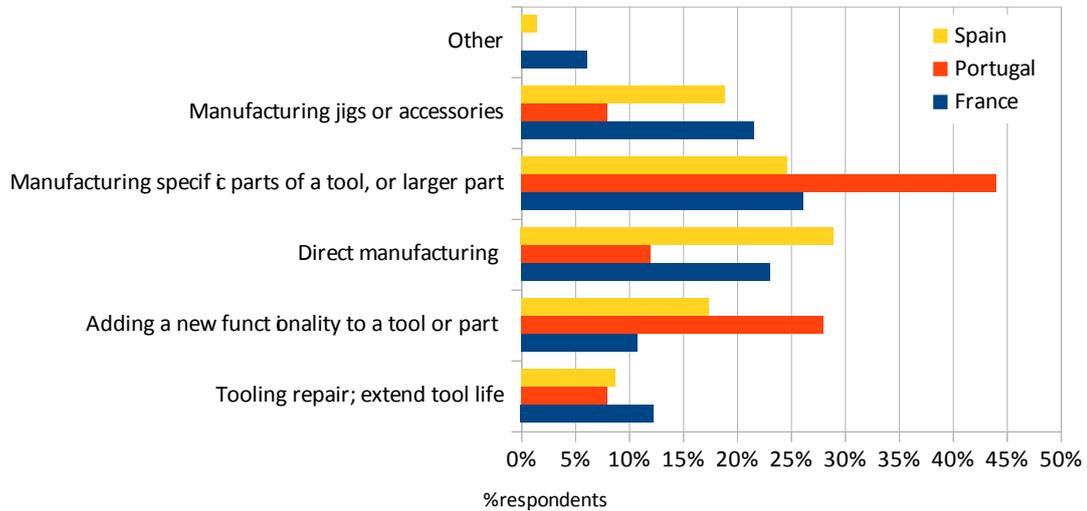


Figura 14. Resultados do inquérito às empresas, indentificando as aplicações mais relevantes em cada país.

Se considerarmos os resultados deste parâmetro por país, podemos observar:

- Os inquiridos espanhóis e franceses também referem "Fabrico de gabaritos ou acessórios" como uma aplicação relevante
- Os respondentes portugueses também selecionaram "Adicionar uma nova funcionalidade a uma ferramenta ou parte" como uma aplicação significativa.

4.1.3. Detalhe sobre materiais e tecnologias AM

Relativamente aos materiais e tecnologias AM atualmente em uso, os inquiridos indicam geralmente que o Aço é o material mais comum, seguido do Alumínio. As tecnologias AM atualmente utilizadas são principalmente o FDM (30%) e o PBF (15%).

4.2. Identificação de oportunidades

A análise detalhada dos resultados do inquérito em cada país estabelece a base para propor oportunidades específicas para o desenvolvimento tecnológico das tecnologias MAM em cada país. Estas são propostas a seguir.

4.2.1. Espanha

Os fabricantes espanhóis de ferramentas industriais produzem atualmente ferramentas de maquinagem, ferramentas de montagem, ferramentas de furação e moldes para plástico, destinados às indústrias Aeronáutica, Automóvel e Espacial. Atualmente, estas indústrias estão interessadas em utilizar tecnologias AM para fabricar uma parte específica de uma ferramenta ou uma peça completa em si, e fabricar gabaritos ou acessórios.

Para as empresas espanholas, as oportunidades podem estar em:

- procurar desenvolver a reparação de ferramentas (utilizando tecnologias AM em grande escala e/ou tecnologias híbridas)
- procurar otimizar as tecnologias já estabelecidas
- procurar alargar os sectores menos representados - moldes para fundição injetada (ligas leves), matrizes de forjamento...

4.2.2. França

Os fabricantes franceses de ferramentas industriais produzem atualmente ferramentas de maquinagem, ferramentas de montagem, ferramentas de furação, moldes para plástico, e matrizes para a conformação de chapas metálicas, destinadas às indústrias Aeronáutica, Automóvel, Energia e Espacial. Atualmente, estas indústrias estão interessadas em utilizar as tecnologias AM para fabricar uma parte específica de uma ferramenta ou uma peça completa em si, e fabricar gabaritos ou acessórios.

Para as empresas francesas, as oportunidades podem estar em:

- procurar desenvolver a reparação de ferramentas e acrescentar funcionalidade a uma ferramenta, utilizando tecnologias AM em grande escala e/ou tecnologias híbridas
- procura otimizar as tecnologias já estabelecidas
- procurar alargar os sectores menos representados - moldes para fundição injetada (ligas leves), matrizes de forjamento...

4.2.3. Portugal

Os fabricantes portugueses de ferramentas industriais produzem atualmente principalmente moldes para plástico, quer destinados à indústria automóvel quer à indústria de eletrodomésticos. Atualmente, estas indústrias estão interessadas em utilizar tecnologias AM utilizadas para o fabrico de insertos de moldes ou para obter funcionalidade acrescida nos moldes.

Para as empresas portuguesas, as oportunidades podem estar em:

- procurar desenvolver estratégias de reparação de ferramentas (utilizando tecnologias AM em larga escala e/ou tecnologias híbridas) ou o fabrico de gabaritos e acessórios.
- procurar otimizar tecnologias já estabelecidas
- procurar alargar os sectores menos representados - ferramentas de montagem, ferramentas de maquinaria.

4.3. Seleção de estudos de caso

Para selecionar o conjunto de estudos de caso a tratar durante o WP2, é agora proposta uma estratégia. Cada parceiro do projeto propõe estudos de caso baseados nos resultados do inquérito - ver as principais áreas potenciais acima - como, por exemplo:

- Pelo menos 1 estudo de caso que aborda uma das principais áreas / tecnologias / escalas (ferramenta / tamanho da parte da ferramenta) identificadas. Isto totaliza 3 estudos de caso.
- Estudos de caso adicionais podem abordar aplicações secundárias / menos exploradas / menos desenvolvidas, das já identificadas acima
- A 4ª proposta de estudo de caso é selecionada tendo em conta todo o espectro de tecnologias / áreas de aplicação / escalas abrangidas por todos os estudos de caso e consideradas como oferecendo o maior potencial de impacto dos resultados do projeto.

Assim, é proposta uma tabela de pontuação - Tabela 1- , para ajudar na seleção da melhor solução para o conjunto de estudos de caso:

Tabela 1. tabela de pontuação para seleção de estudos de caso. Legenda: Escala S – pequeno, M – médio, L – grande | TRL – Nível de prontidão da tecnologia | Sectores : Auto – automóvel; HA – eletrodomésticos, Food – Alimentar, Aero – Aeronáutica, Sp – Espacial, O&G – petróleo & gas, Agl – Agro-indústria, EN – Energia, Def – Defesa.

Case study	Materials	Score	Technologies	Score	Scale	Sector	TRL
PT1 – mould inserts	Steels	1	SLM, Milling	2	S	Auto, HA	5 to 6
PT2 – moulds for glass	Steels, Nickel	2	SLM, DED, Milling	3	S	Food	3 to 4
ES1							
ES2							
ES3							
FR1							
FR2							
FR3							

Os parceiros do projeto podem contactar parceiros regionais associados / empresas locais para propor os estudos de caso mais relevantes a serem incluídos na lista de candidatos. Os critérios de seleção do conjunto apropriado de estudos de caso devem ser discutidos e definidos por todos os parceiros associados do projeto. Após a recolha de todas as propostas, a escolha do conjunto de 4 estudos de caso finais, com base nos critérios definidos acima, pode ser completada.

5. REFERÊNCIAS

[01] Global 3D printing Metal Market Size & Share. Polaris Market Research Report, 2021 (PM1153).

[02] 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.

[03] Overcoming the top Metal 3D printing Challenge, Metal 3D printing-3DEO, December 2017. <https://www.3deo.co/metal-3d-printing/overcoming-the-top-metal-3d-printing-challenges/>

[04] The government office for science, “The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK,” London, 2013.

[05] European Commission, “Advancing Manufacturing- Advancing Europe-Report of the task force on advanced manufacturing for clean production,” Brussels, 2014.

[06] Wohlers associates, “Wohlers report 2016. 3D printing and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report,” 2016.

[07] R. Berger, “Additive Manufacturing – next generation,” 2016

[08] [64] Gibson, I., Rosen, D.W. and Stucker, B. (2010), “Additive Manufacturing Technologies”, Springer, London 59

[09] J. B. Jones, “The synergies of hybridizing CNC and additive manufacturing,” *Tech. Pap. - Soc. Manuf. Eng.*, vol. TP14PUB72, pp. 1–8, 2014.

[10] K. A. Lorenz, J. B. Jones, D. I. Wimpenny, and M. R. Jackson, “A Review of Hybrid Manufacturing,” *Igarss* 2014, no. 1, pp. 1–5, 2014, doi: 10.1007/s13398-014-0173-7.2.

[11] M. Cortina, J. I. Arrizubieta, J. E. Ruiz, E. Ukar, and A. Lamikiz, “Latest developments in industrial hybrid machine tools that combine additive and subtractive operations,” *Materials (Basel)*, vol. 11, no. 12, 2018, doi: 10.3390/ma11122583.

[12] T. Yamazaki, “Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining,” *Procedia CIRP*, vol. 42, no. Isem Xviii, pp. 81–86, 2016.

- [13] N. Asnafi, J. Rajalampi, D. Aspenberg, e A. Alveflo, «Production Tools Made by Additive Manufacturing Through Laser-based Powder Bed Fusion», *Berg Huettenmaenn Monatsh*, vol. 165, n. 3, pp. 125–136, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00501-020-00961-8.
- [14] Asnafi, N.; Alveflo, A.: 3D Metal printing of Stamping Tools & Dies and Injection Molds. Proceedings of at Tooling 2019 Conference and Exhibition, 12–16 May, 2019, Aachen, Germany, 2019
- [15] N. Asnafi, T. Shams, D. Aspenberg, e C. Öberg, «3D Metal Printing from an Industrial Perspective—Product Design, Production, and Business Models», *Berg Huettenmaenn Monatsh*, vol. 164, n. 3, pp. 91–100, Mar. 2019, doi: 10.1007/s00501-019-0827-z.
- [16] Chantzis, D., Liu, X., Politis, D.J. et al. Review on additive manufacturing of tooling for hot stamping. *Int J Adv Manuf Technol* 109, 87–107 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05622-1>
- [17] M. Cortina, J. Arrizubieta, A. Calleja, E. Ukar, and A. Alberdi, “Case Study to Illustrate the Potential of Conformal Cooling Channels for Hot Stamping Dies Manufactured Using Hybrid Process of Laser Metal Deposition (LMD) and Milling,” *Metals*, vol. 8, no. 2, p. 102, Feb. 2018.

**Interreg
Sudoe**



EUROPEAN UNION

ADDITOOL

European Regional Development Fund

www.additool.eu