



METALSHOE
FABLAB NETWORK

01

— Referencial Técnico

MANUFATURA ADITIVA NAS INDÚSTRIAS DO CALÇADO E DA METALOMECÂNICA





METALSHOE
FABLAB NETWORK

01

www.metalshoefablab.pt

Referencial Técnico

MANUFATURA ADITIVA NAS INDÚSTRIAS DO CALÇADO E DA METALOMECÂNICA

Ficha técnica

Título

01 Referencial Técnico - Manufatura Aditiva nas indústrias do Calçado e da Metalomecânica

Coordenação

Cristina Marques e Vânia Pacheco

Projecto gráfico e paginação

SALTO ALTO ctcip criativo

Textos

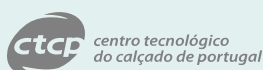
Florbela da Silva
Pedro Duarte
Sónia de Brito
Luís Rocha

Com o apoio de

CEI - Companhia de Equipamentos Industriais, Lda.

Dezembro 2021 . TODOS OS DIREITOS RESERVADOS

Versão 01



Este referencial foi desenvolvido no âmbito do projeto Metalshoe Fablab Network
Operação N.º NORTE-02-0853-FEDER-037621

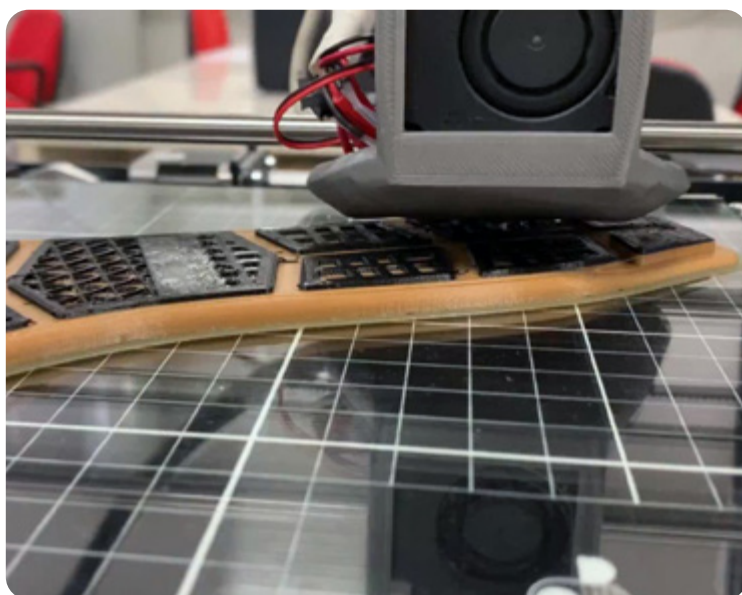
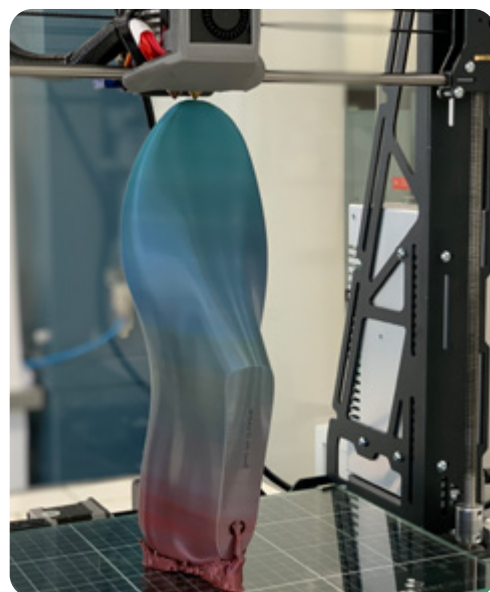
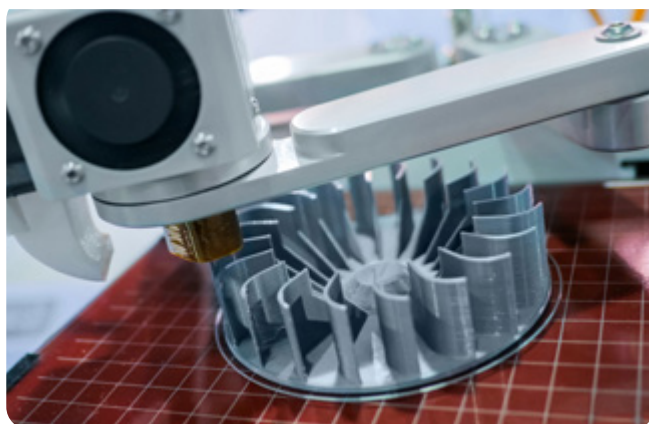


ÍNDICE

Introdução	4
Enquadramento	5
Descrição das tecnologias	9
Manufatura aditiva na indústria Metalomecânica e casos de estudo	16
Manufatura aditiva na indústria do Calçado e casos de estudo	21
Enquadramento no MetalShoe FabLab	29
Bibliografia	32

INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA), comumente conhecida como impressão 3D ou prototipagem rápida, é um processo disruptivo que permite a produção de objetos tridimensionais com geometria complexa e altamente personalizáveis. A MA é composta por várias técnicas e processos, variando no seu princípio de funcionamento e nos seus materiais, quer no tipo quer na forma. Este referencial centra-se na descrição tecnológica da MA, respetivas potencialidades e que técnicas e materiais serão mais adequados a determinadas aplicações, mais concretamente para a sua implementação na indústria do calçado e marroquinaria e na indústria da metalomecânica.

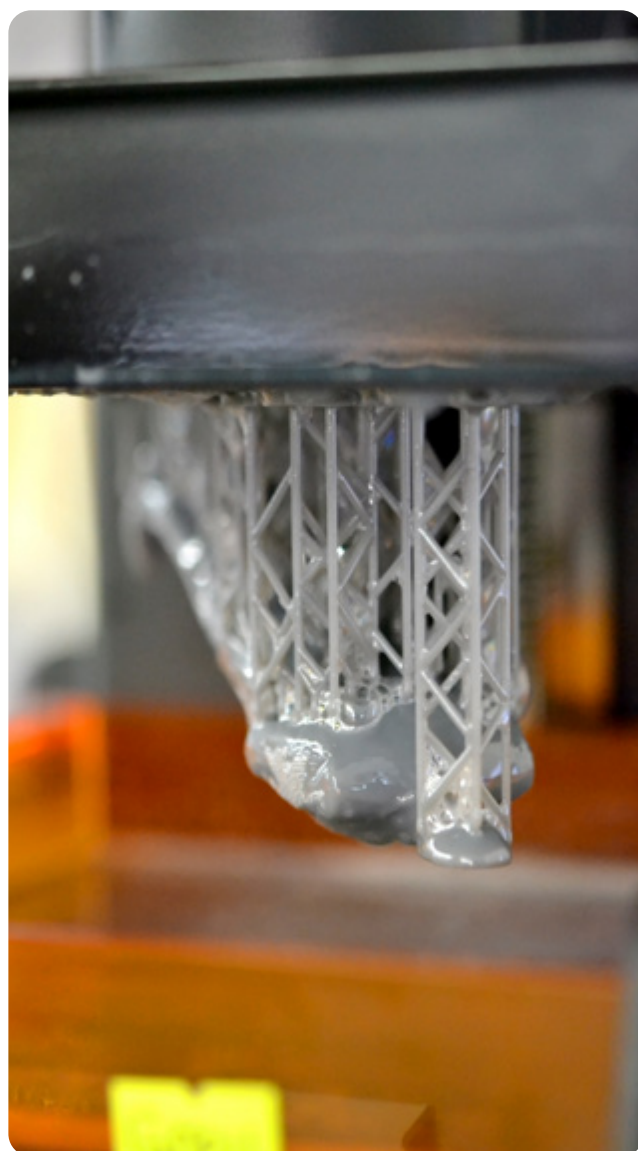


ENQUADRAMENTO

A tecnologia de MA surgiu na década de 80 com o processo de estereolitografia, também conhecido por SLA (*Stereolithography Apparatus*) associado à tecnologia de CAM/CAD (*Computer-Aided Manufacturing / Design*). O princípio de funcionamento deste processo é baseado na construção, camada a camada, de um objeto físico, a partir de um modelo virtual desenhado em CAD, através da cura de uma resina fotossensível à luz ultravioleta (UV). Este processo permitiu a construção rápida de protótipos, modelos, formas para moldes, etc. dando assim origem ao termo de prototipagem rápida, uma aplicação da MA. Rapidamente esta tecnologia escalou com a criação e desenvolvimento de novos processos derivativos do SLA sendo agora também possível fabricar peças 3D em cerâmica, plástico, metal e compósitos. Adicionalmente, a evolução da tecnologia permitiu que não só fossem produzidos protótipos, mas também peças funcionais.

Quanto ao tipo de produtos que se conseguem obter por MA, é de realçar o impacto na sustentabilidade destas tecnologias. O facto dos objetos serem construídos em processos camada a camada, reduz não só desperdício de matéria-prima mas também a produção de resíduos, em oposição com outros processos.

Contrariamente à MA, a manufatura subtrativa utiliza uma ferramenta para remover material de um bloco sólido, até que o objeto final esteja concluído. No caso da manufatura formativa, como por exemplo a injeção, o material é introduzido num molde que dará forma ao objeto final.



Os processos de manufatura por junção, como por exemplo a soldadura, são usados para unir duas partes e formar o objeto final. Estes são os processos possíveis para se produzir um objeto e que estão ilustrados na figura 1.

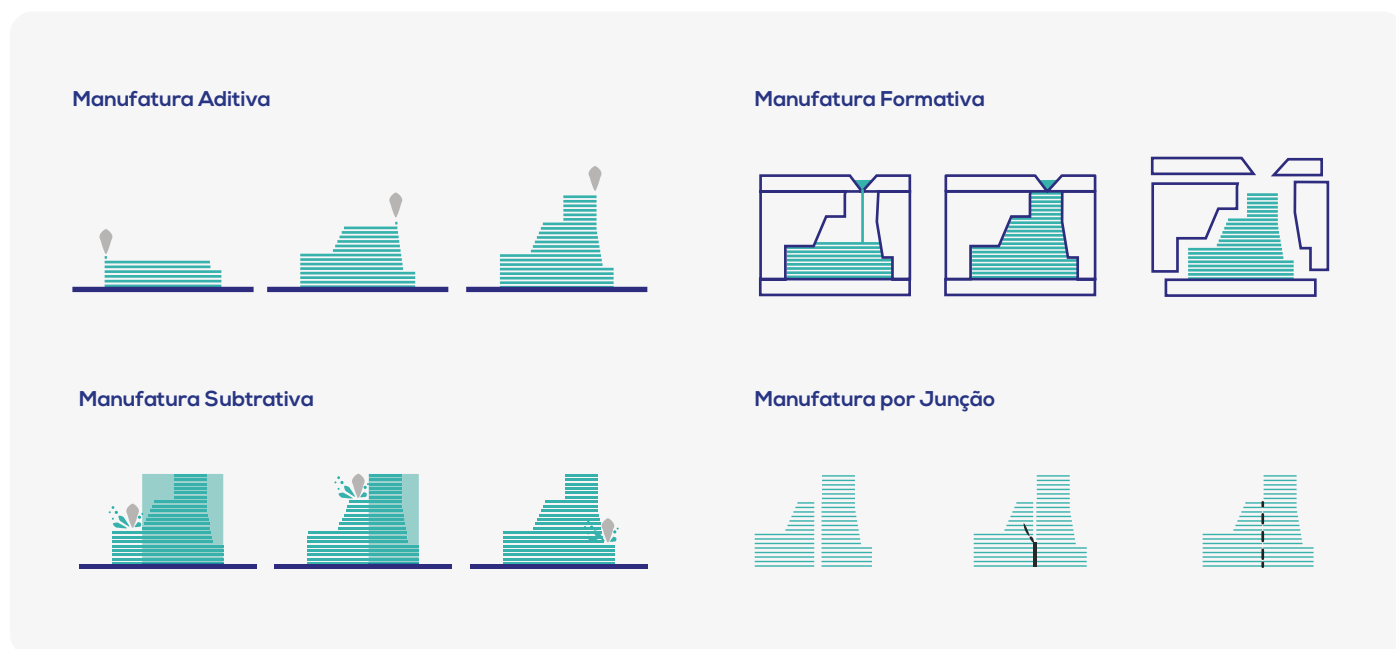


Figura 1

Representação esquemática do princípio de funcionamento dos processos de manufatura aditiva, subtrativa, formativa e por junção, adaptado de [1].

Em termos do custo dos vários processos produtivos acima referidos, verifica-se que ao longo do tempo o custo de produção de um objeto por MA mantém-se constante, ao contrário dos restantes processos tal como é possível observar na figura 2.

O elevado custo inicial das peças produzidas por processos formativos está associado ao desenvolvimento inicial de moldes para a etapa de conformação. Este custo é, no entanto, reduzido mediante o número de peças produzidas, podendo até ser inferior comparativamente à MA ou manufatura subtrativa. Pode-se então afirmar que, a produção por processos formativos pode ser vantajosa para o caso de produção em massa.

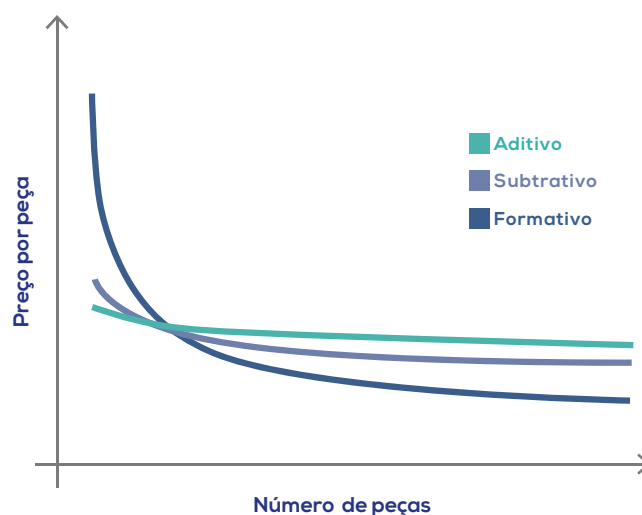


Figura 2

Gráfico comparativo da evolução do custo por peça em função do número de peças a produzir, para processos de manufatura aditiva, subtrativa e formativa, adaptado de [1].

Já no caso da manufatura subtrativa (por exemplo, maquinação CNC), onde a evolução do custo por objeto pode ser similar ao da MA, implica um consumo de material maior que pode ser ou não recuperado/reciclado. Ainda comparando a manufatura subtrativa com a aditiva, pode-se verificar através da figura 3 que se ao invés de se analisar o custo por peça dependendo do número de objetos a produzir, analisar o seu custo em função da complexidade geométrica do objeto, percebe-se rapidamente que o custo de produzir o objeto por maquinação CNC, será muito mais elevado, podendo nem sequer ser economicamente viável.

O mesmo se aplica a objetos complexos produzidos por manufatura formativa, sendo a manufatura por junção muitas vezes a escolhida para os objetos de elevada complexidade de forma. No caso de objetos de elevada complexidade geométrica produzidos por MA, verifica-se que o custo permanece constante, sendo esta uma das principais vantagens da MA: produção de objetos de formas complexas e que poderão ser impossíveis de produzir por qualquer outra forma.

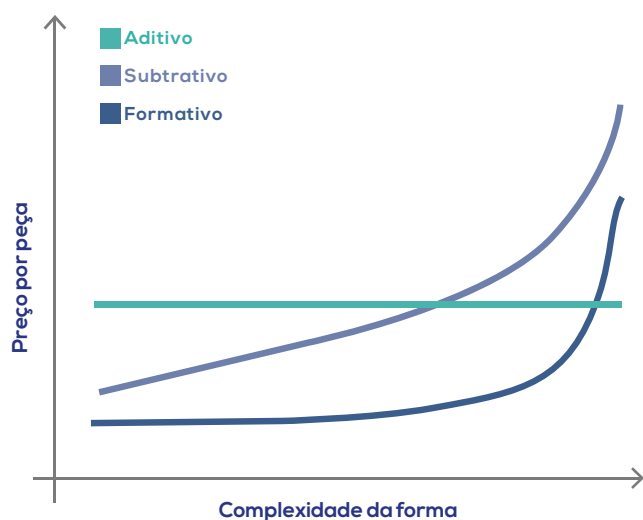


Figura 3

Gráfico comparativo da evolução do custo por peça em função da complexidade geométrica do objeto a produzir, para processos de manufatura aditiva, subtrativa e formativa, adaptado de [1].

Assim sendo, por que razão não está toda a indústria a produzir os seus próprios protótipos por MA?

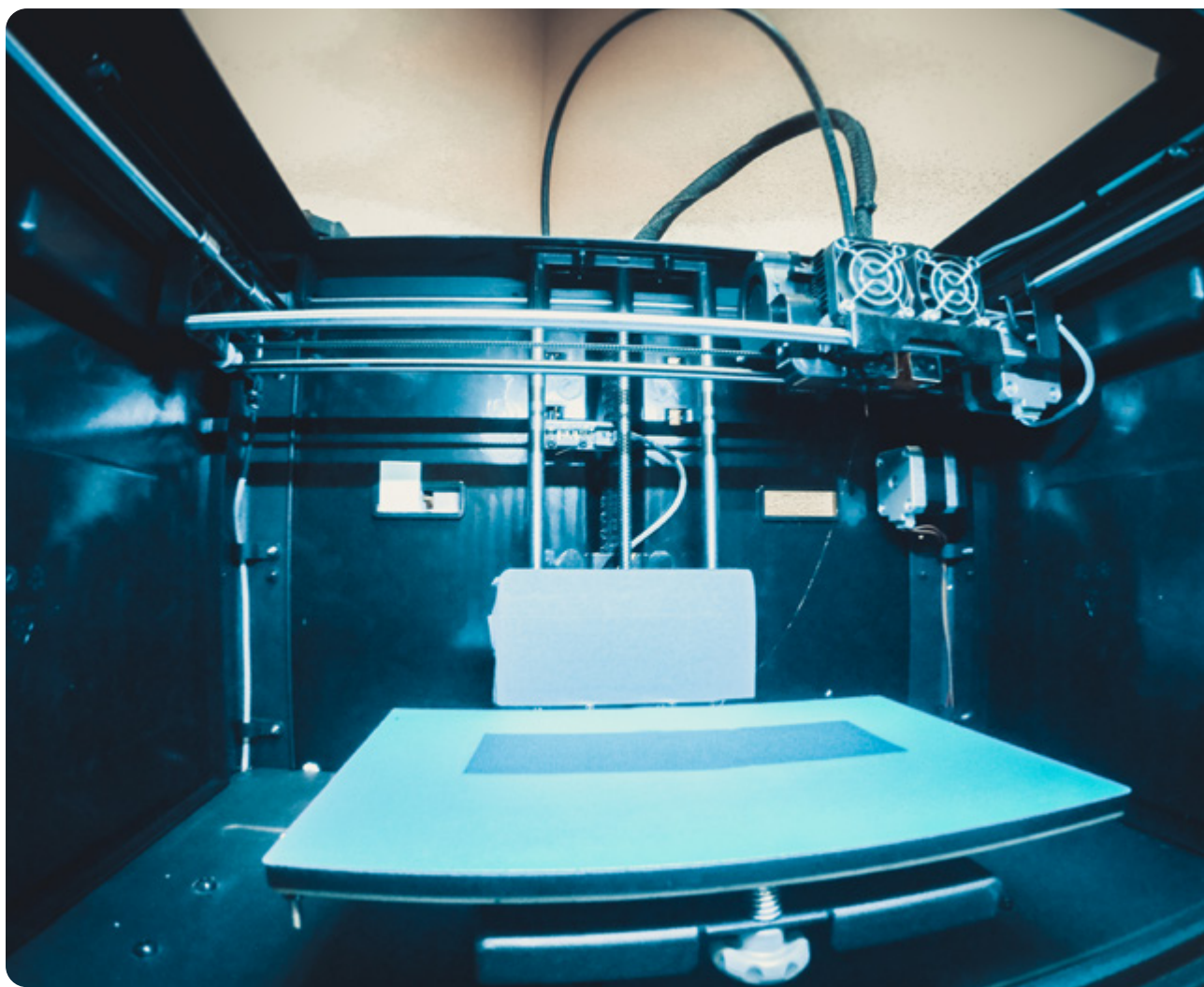
De acordo com a Desktop Metal [2], um dos principais produtores de equipamentos de MA para materiais metálicos, a resposta prende-se essencialmente com o início da tecnologia da MA. A tecnologia cresceu acompanhada pela ideia de que é possível imprimir qualquer objeto independentemente da sua geometria e design. No entanto, os objetos poliméricos produzidos com os primeiros equipamentos eram frequentemente descredita-dos pelo seu fraco acabamento superficial, pela sua elevada porosidade e baixa resistência mecânica, entre outros defeitos. Com o evoluir da tecnologia, quer em termos de processos quer em termos de materiais, muitos destes defeitos foram sendo ultrapassados.

Nas últimas décadas, as equipas de desenvolvimento de produto recorriam ao uso de tecnologias convencionais como maquinação CNC, fundição, desbaste ou furação para produzir os seus protótipos funcionais, as quais, como referido acima, podem tornar-se extremamente caras, demoradas e que requerem operadores qualificados. Todos estes factos são limitações na conceção de protótipos e na eficiência do ciclo de desenvolvimento de produto.

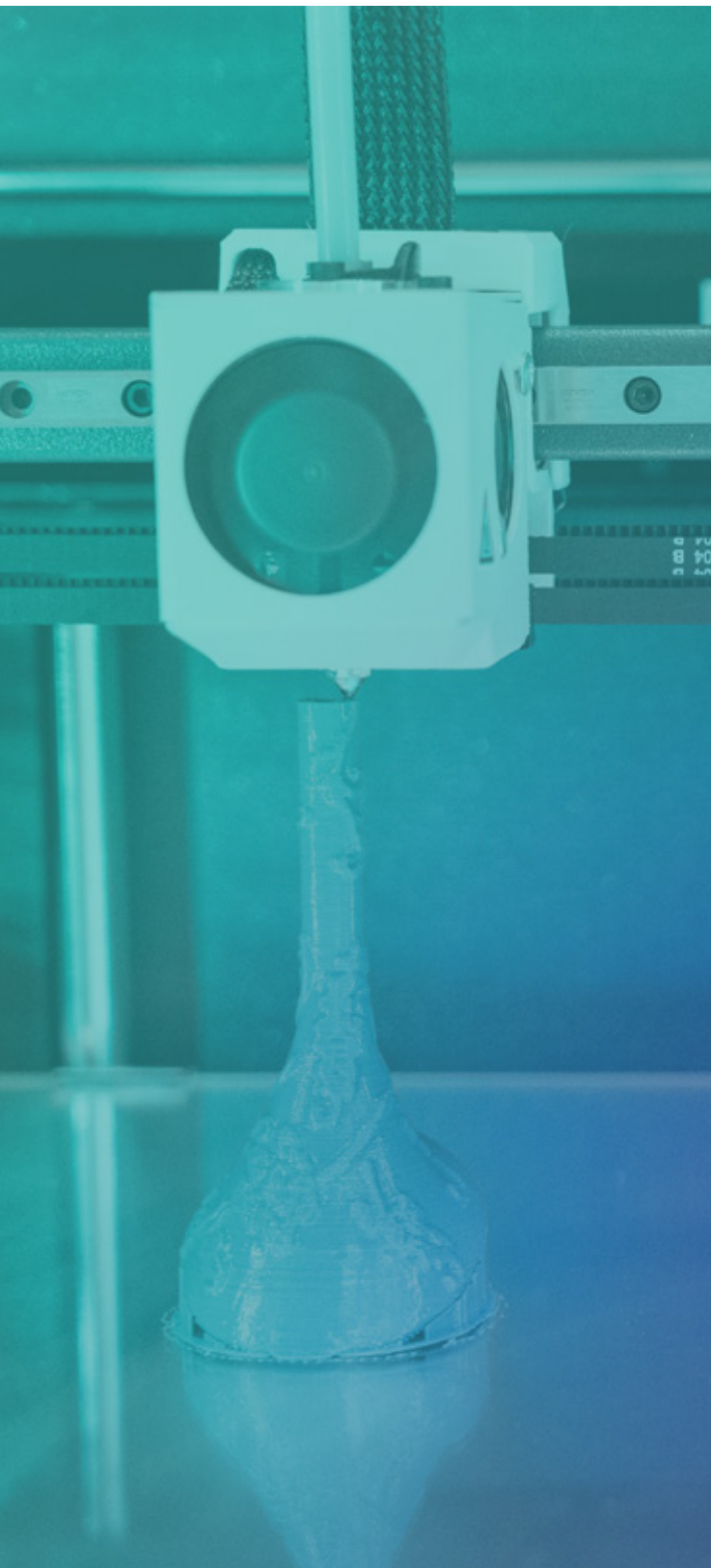
É aqui que a MA será disruptiva, mudando completamente o paradigma da prototipagem de objetos, independentemente da aplicação ou material a ser usado. Hoje em dia, os processos de MA permitem produzir não apenas protótipos, mas também produção de peças funcionais, em alguns casos com características excecionais.

Estas mudanças começaram, por exemplo, com o aparecimento dos primeiros equipamentos de MA de metais. No entanto, estes equipamentos baseados no uso de lasers para fundir ou sinterizar pós metálicos, eram lentos, caros e com necessidade de espaço com ambiente controlado, o que significava maior investimento em adição aos equipamentos e materiais. Estes factos são os que alicerçam a ideia de que estas tecnologias seriam mais apropriadas para indústrias como a aeroespacial e a indústria médica, onde a elevada personalização, complexidade geométrica e o baixo número de objetos produzidos potenciam estas tecnologias. No entanto, para a maioria das indústrias a lentidão do processo e o elevado custo seriam sempre limitações a considerar.

A expiração das patentes relacionadas com o processo de MA levou ao aparecimento de novos fabricantes e novos equipamentos fazendo com que o preço destas tecnologias baixasse significativamente. Adicionalmente, o aumento da concorrência levou à necessidade de desenvolver e colocar no mercado equipamentos cada vez mais ágeis, flexíveis e capazes de produzir peças com elevada qualidade. Atualmente, é possível produzir protótipos funcionais em apenas alguns dias, em oposição aos métodos convencionais que poderia levar semanas ou mesmo meses.



Descrição das tecnologias



De acordo com a norma ASTM F2792-12a, os processos de MA são definidos como os processos em que o material é adicionado para construir um objeto a partir de um modelo virtual, geralmente em processos de camada a camada [3]. Agrupar tecnologias pode ser um desafio e pode ter diferentes abordagens, sendo uma delas pelo seu princípio de funcionamento. De acordo com a norma ASTM F2792-12a [3], **existem 7 classes de processo de MA:**

1. Jato de ligante (*Binder Jetting*);
2. Deposição de energia direcionada (*Directed Energy Deposition*);
3. Extrusão de material (*Material Extrusion*);
4. Jato de material (*Material Jetting*);
5. Fusão em cama de pó (*Powder Bed Fusion*);
6. Laminação em folha (*Sheet Lamination*);
7. Fotopolimerização em cuba (*VAT Photopolymerization*).

Na tabela I são apresentadas as classes de MA, o seu princípio de funcionamento, técnicas representativas, diferentes materiais e suas formas.

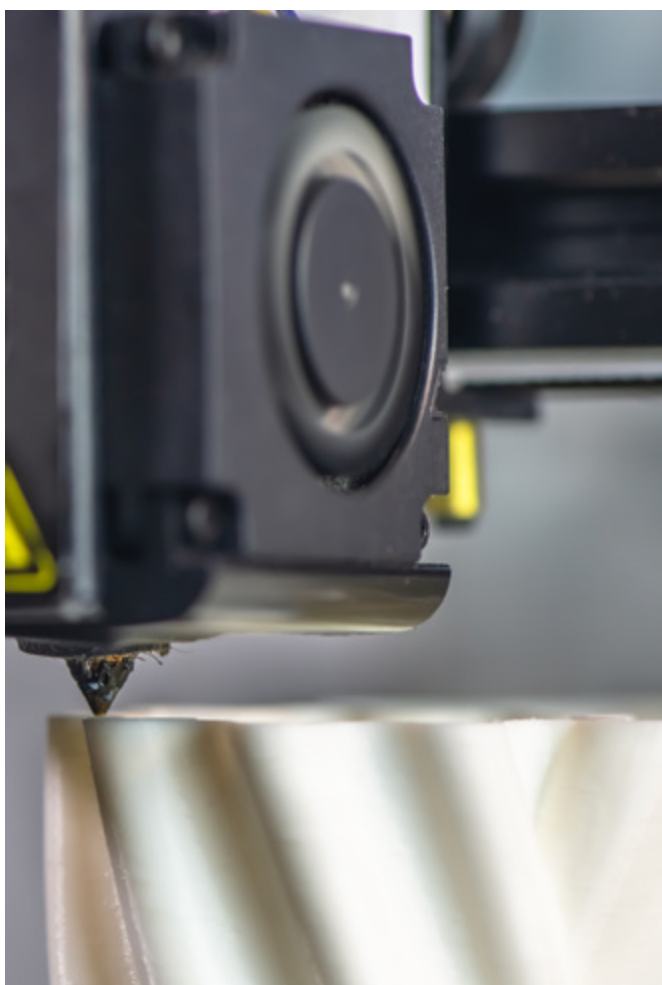
Tabela I - Categorias de processos de MA, o seu princípio de funcionamento, as principais técnicas, as formas de material precursor e as suas classes [3].

Categorias dos processos de MA (ASTM F2792)	Descrição	Técnicas	Forma Material	Materiais
Jato de ligante <i>Binder Jetting</i>	Agente de ligação líquido é depositado seletivamente para aglutinar as partículas de material na cama de pó	<ul style="list-style-type: none"> – 3D Printing – MJP – Inkjet Printing 	<ul style="list-style-type: none"> – Pó 	<ul style="list-style-type: none"> – Metais – Cerâmicos – Polímeros – Compósitos – Híbridos
Deposição de Energia Direcionada <i>Directed Energy Deposition</i>	Energia térmica é focada para unir o material por fusão enquanto este é depositado	<ul style="list-style-type: none"> – LENS – Electron Beam – Plasma Arc Melting – Contour Crafting – LMD – DMD 	<ul style="list-style-type: none"> – Pó – Filamento 	<ul style="list-style-type: none"> – Metais – Polímeros – Compósitos – Híbridos
Extrusão de Material <i>Material Extrusion</i>	Material é seletivamente depositado através de um bico ou orifício de extrusão	<ul style="list-style-type: none"> – FFF/FDM – Robocasting – Bioplotting – Contour crafting – Fused Layer Modelling 	<ul style="list-style-type: none"> – Filamento – Pasta – Suspensão 	<ul style="list-style-type: none"> – Polímeros – Cerâmicos – Metais – Compósitos
Jato de Material <i>Material Jetting</i>	Gotas do material de construção são seletivamente depositadas	<ul style="list-style-type: none"> – Polyjet – DoD – NP Jetting – Inkjet Printing – DIW 	<ul style="list-style-type: none"> – Líquido – Suspensão 	<ul style="list-style-type: none"> – Polímeros – Suspensões cerâmicas – Compósitos – Híbridos – Biológicos
Fusão em Cama de Pó <i>Powder Bed Fusion</i>	Energia térmica funde seletivamente o material na cama de pó	<ul style="list-style-type: none"> – SLS – SLM – DMLS – EBAM – MJF 	<ul style="list-style-type: none"> – Pó 	<ul style="list-style-type: none"> – Polímeros – Metais – Cerâmicos – Compósitos – Híbridos
Laminação em Folha <i>Sheet Lamination</i>	Folhas de material são ligadas e cortadas para formar o objeto	<ul style="list-style-type: none"> – UC/UAM – LOM 	<ul style="list-style-type: none"> – Folha 	<ul style="list-style-type: none"> – Metais – Cerâmicos – Polímeros – compósitos – Híbridos
Fotopolimerização em Cuba <i>Vat Photopolymerization</i>	Líquido fotossensível é curado por polimerização usando uma fonte de luz	<ul style="list-style-type: none"> – SLA – Micro-SLA – DLP – CLIP 	<ul style="list-style-type: none"> – Líquido – Suspensão 	<ul style="list-style-type: none"> – Resinas e ceras – Polímeros – Suspensões cerâmicas – Suspensões metálicas

Com a evolução e desenvolvimento dos materiais para MA, tem-se tornado cada vez mais comum vermos materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos usados em todas as classes de MA, como listado na Tabela I.

No entanto, nem sempre assim foi, por exemplo, no caso de materiais metálicos, as técnicas que se englobam nas categorias fotopolimerização em cuba e jato de material, eram pouco usadas pela dificuldade de preparar os materiais metálicos para estas tecnologias, por inadequação dos processos para esta classe de materiais ou simplesmente por ainda não ter crescido o interesse das indústrias nestas tecnologias face às que estão já mais bem estabelecidas.

O mesmo se verifica para materiais cerâmicos, sendo os poliméricos os mais bem desenvolvidos para todas as classes pela sua facilidade de adaptação a cada processo e pela larga variedade de materiais.



Em seguida ilustramos e descrevemos o princípio de funcionamento de uma técnica representativa de cada classe de MA.

Jato de ligante (*Binder Jetting*): nesta categoria o material é usado na forma de pó e depositado em uma cama por ação de um rolo. Neste caso uma cabeça de impressão é responsável pela deposição seletiva de um ligante líquido na secção correspondente a cada camada do objeto a imprimir, e que será responsável por ligar as partículas do pó de material na cama de construção (figura 4).

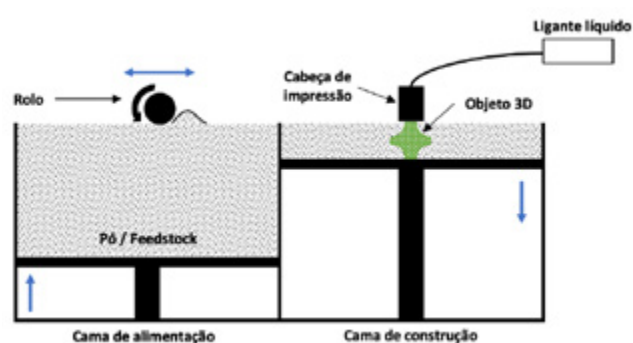


Figura 4

Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe jato de ligante, adaptado de [1].

Nesta tecnologia é possível usar diferentes ligantes líquidos, por exemplo com diferentes cores, para imprimir diferentes partes do objeto com diferentes características. Após o final da impressão é usual ter um tempo de secagem do ligante líquido para que os objetos impressos tenham resistência mecânica suficiente para serem manipulados.

Deposição Direcionada de Energia (*Directed Energy Deposition*): nas tecnologias desta categoria, o material, tipicamente metálico, pode ser usado na forma de fio / filamento ou na forma de pó. Uma fonte de energia é usada e direcionada localmente para o mesmo ponto onde o material está a ser depositado, fundindo-o e criando a ligação com as camadas adjacentes (figura 5).

Este princípio de funcionamento, geralmente combinado com uma plataforma de construção com movimentos em coordenadas polares, permite o seu uso para processos de reparação ou mesmo geometrias complexas sem a necessidade de uso de estruturas de suporte.

Extrusão de Material (*Material Extrusion*): nesta categoria o material é usado na forma líquida, em forma de pasta ou de fio (filamento) e a componente de extrusão é responsável por depositar o material seletivamente para cada camada do objeto a construir através de um orifício. Após a impressão de cada camada, a cabeça de extrusão ou a cama de construção são responsáveis por subir ou descer o equivalente à altura de uma camada e o processo repete-se até que o objeto seja construído (figura 6). Nas tecnologias baseadas em extrusão de material é recorrente a necessidade de impressão de estruturas de suporte que possibilitam a impressão de partes do objeto e que podem ser do mesmo material ou de um material diferente, sendo removidas mais tarde.

Jato de material (*Material Jetting*): nesta classe o material é usado na forma líquida, seja como resina líquida ou suspensão. Uma cabeça de impressão é responsável por depositar gotas de material para cada camada, sendo depois curadas por ação de uma fonte de energia, usualmente uma luz UV ou uma fonte de calor (figura 7).

Este princípio de funcionamento permite um controlo local das propriedades do objeto a imprimir, sendo possível o seu controlo para cada gota depositada.

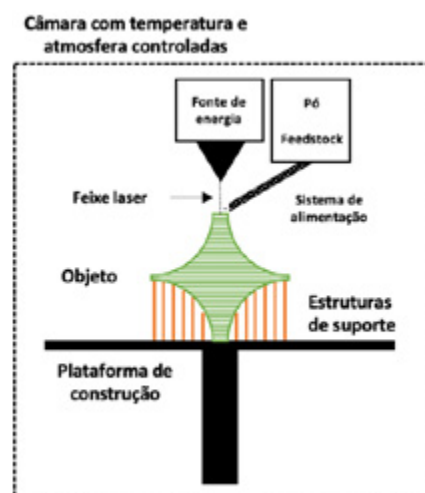


Figura 5

Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe deposição de energia direcionada, adaptado de [1].

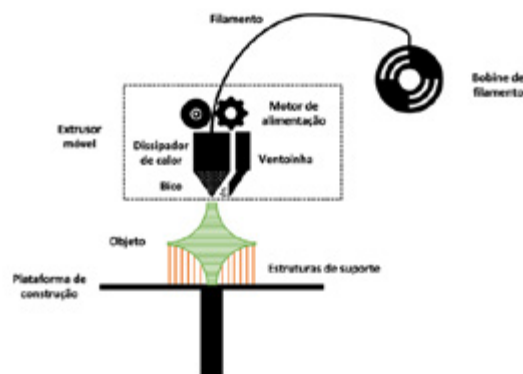


Figura 6

Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe extrusão de material, adaptado de [1].

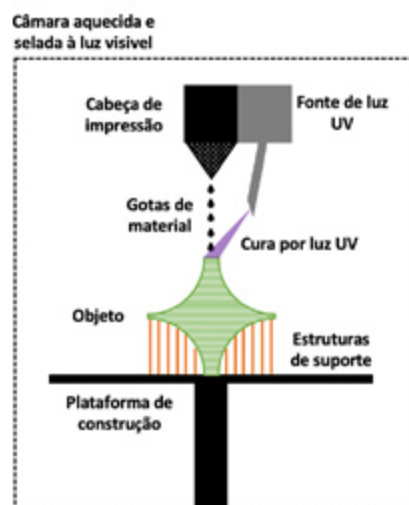


Figura 7

Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe jato de material, adaptado de [1].

Fusão em Cama de Pó (*Powder Bed Fusion*): nesta categoria o material, usado na forma de pó, é depositado numa cama de pó por ação de um rolo. Em seguida, uma fonte de energia, por exemplo um feixe laser ou um feixe de elétrões, é usada para seletivamente fundir ou sinterizar o material nas zonas correspondentes a cada secção da camada do objeto a construir (figura 8).

Este processo é repetido até que o objeto esteja totalmente construído. Dependendo do tipo de material a usar, a câmara de construção tem de estar sob atmosfera inerte para evitar oxidação ou combustão do material a sinterizar.

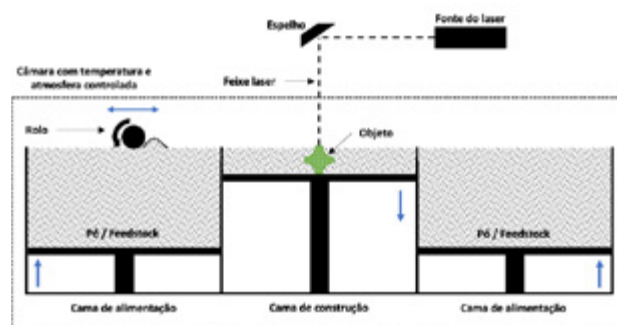


Figura 8
Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe fusão em cama de pó, adaptado de [1].

Laminação em Folha (*Sheet Lamination*): neste conjunto de técnicas o material é usado na forma de folha (chapa fina), usualmente revestida com um material adesivo numa das superfícies, e uma fonte de energia, que pode ser jato de água, laser de corte ou ponta de ultrassons, é responsável por cortar a secção de cada camada do objeto a construir. Em seguida um rolo é usado para pressionar cada folha de material com as adjacentes, com o objetivo de as unir. Este rolo pode ser aquecido para facilitar a aderência entre as folhas (figura 9).

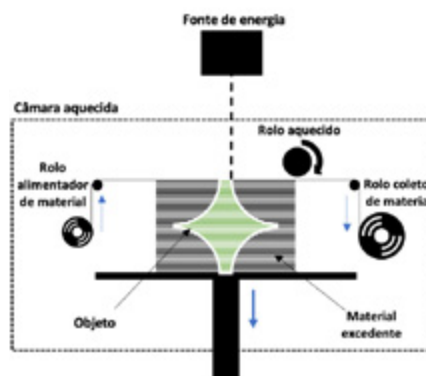


Figura 9
Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe laminação em folha, adaptado de [1].

Fotopolimerização em Cuba (*VAT Photopolymerization*): nas tecnologias desta classe, um feixe de luz, usualmente UV, é responsável por curar seletivamente um polímero fotossensível dentro de uma cuba. A plataforma de construção é responsável por controlar a espessura de camada, mantendo a camada a ser impressa no ponto focal do feixe de luz para assim permitir a cura da resina (figura 10). Devido ao uso de um feixe de luz, a resolução de impressão por estas tecnologias é maximizada, permitindo a impressão de elevado grau de detalhe, no entanto tem como contraponto o demorado tempo para a impressão total de um objeto. Assim, o desenvolvimento da tecnologia trouxe o uso de uma máscara que assim permite fazer a curar de uma camada completa, em oposição a uma cura ponto a ponto.

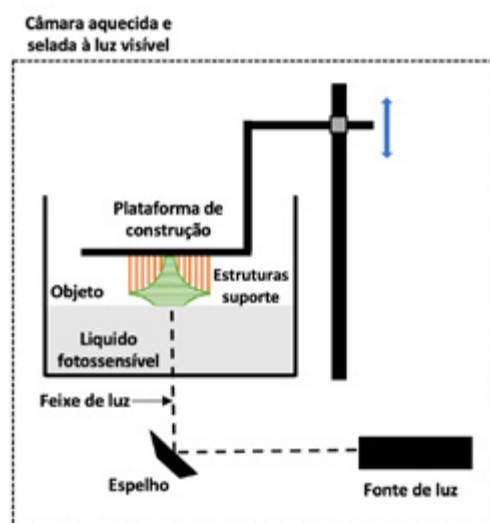


Figura 10
Representação esquemática do princípio de funcionamento de técnicas de MA na classe fotopolimerização em cuba, adaptado de [1].

Como descrito atrás, há uma grande variedade de tecnologias disponíveis para produzir objetos por MA. A seleção da tecnologia poderá basear-se no tipo de material a usar, pela aplicação dos objetos impressos, velocidade de impressão e até mesmo nível de investimento. Na tabela II listamos as principais vantagens e desvantagens de cada uma das classes de MA.

Tabela II - Principais vantagens e desvantagens de cada classe de MA (adapt. [4])

Categorias dos processos de MA (ASTM F2792)	Vantagens	Desvantagens
Jato de ligante <i>Binder Jetting</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Não necessita de estruturas de suporte – Liberdade de design – Grande volume de impressão – Elevada velocidade de impressão – Baixo custo de processo 	<ul style="list-style-type: none"> – Peças impressas com baixa resistência mecânica – Pode necessitar de etapas de pós-processamento
Deposição Direcionada de Energia <i>Directed Energy Deposition</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Elevado controlo da estrutura de grão – Peças com elevada qualidade – Excelente para aplicações de reparação 	<ul style="list-style-type: none"> – Balanço entre a velocidade de impressão e o acabamento superficial – Consumo energético – Limitação no tipo de materiais
Extrusão de Material <i>Material Extrusion</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Variedade de aplicações e indústrias onde pode ser usado – Baixo investimento e custo – Facilmente escalável – Possibilidade para produzir objetos funcionais 	<ul style="list-style-type: none"> – Anisotropia de propriedades – Acabamento superficial lateral em estrutura de escada – Não aconselhável para objetos com detalhes
Jato de Material <i>Material Jetting</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Elevada precisão na deposição das gotas – Resíduos reduzidos – Impressão multimaterial – Impressão multicor 	<ul style="list-style-type: none"> – Necessidade de estruturas de suporte – Necessidade de usar materiais fotossensíveis
Fusão em Cama de Pó <i>Powder Bed Fusion</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Baixa pegada ecológica – Cama de pó atua como estrutura de suporte – Alargada variedade de materiais possíveis de usar 	<ul style="list-style-type: none"> – Baixa velocidade de impressão – Limitação em termos de volume de impressão – Elevada quantidade de material necessário – Acabamento superficial depende do material precursor
Laminação de Folhas <i>Sheet Lamination</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Elevada velocidade de impressão – Baixo investimento e custo – Facilidade de manipular os materiais percursores 	<ul style="list-style-type: none"> – A resistência mecânica dos objetos depende do adesivo usado – Fraco acabamento superficial lateral – Limitação nos materiais possíveis de usar – Limitação nas geometrias dos objetos a produzir
Fotopolimerização em Cuba <i>Vat Photopolymerization</i>	<ul style="list-style-type: none"> – Excelente acabamento superficial e detalhes dos objetos – Excelente precisão de impressão 	<ul style="list-style-type: none"> – Necessidade de uso de materiais fotossensíveis – Custo dos materiais percursores – Exposição a comprimentos de onda

A MA permite a construção de objetos tridimensionais com designs e estruturas que seriam difíceis, caros ou mesmo impossíveis de produzir por qualquer outro processo. Uma das grandes vantagens da MA é a possibilidade de produzir objetos diretamente a partir de um modelo virtual (CAD), sem o recurso de ferramentaria de elevado custo, criando a possibilidade de produção rápida de objetos metálicos, reduzindo o stock de peças de substituição. Outra vantagem é a redução drástica no tempo de produção de objetos singulares e/ou críticos. [5]

Uma característica de objetos produzidos por MA, é que o seu preço é quase sempre o mesmo, independentemente do número de peças a produzir, principalmente se excluirmos os custos iniciais do desenho do objeto, preparação da máquina e tempo despendido em ambos. Comparando com os processos convencionais de produção de objetos metálicos, como por exemplo fundição, maquinação, entre outros, estes processos tornam-se cada vez mais baratos com o aumento do número de objetos produzidos, no entanto para produções de baixo número de objetos, os custos associados com os processos convencionais tornam-se proibitivos. Neste sentido, a MA torna-se no processo mais apetecível para pequenas produções, objetos personalizados e geometrias complexas, levando a que cada vez mais seja aceite como um processo produtivo na indústria metalúrgica, trazendo um novo paradigma no design de objetos e componentes de elevada performance para indústrias como aeroespacial, automotiva, médica e do sector energético, como mostra o gráfico da figura 11.

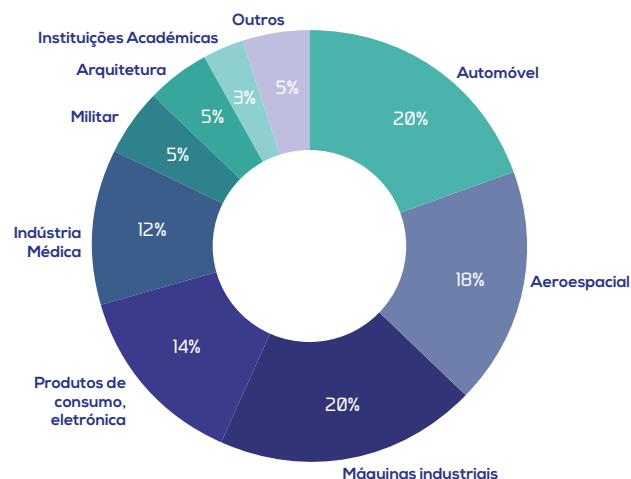


Figura 11

Adoção industrial de tecnologias de MA, em 2018 [6].

A tecnologia de MA mais usada é sem dúvida o FFF (*Fused Filament Fabrication*) pela sua limpeza e facilidade de uso por parte de qualquer utilizador. No entanto, os materiais mais usados são filamentos poliméricos devido à baixa temperatura de fusão. Com o evoluir da tecnologia e dos materiais há cada vez mais filamentos de base polimérica com carga metálica, criando uma rutura quanto às tecnologias de MA mais usadas para materiais metálicos, como ilustrado na figura 12, pois em 2020, as tecnologias mais usadas tinham como base os materiais na base de pó.

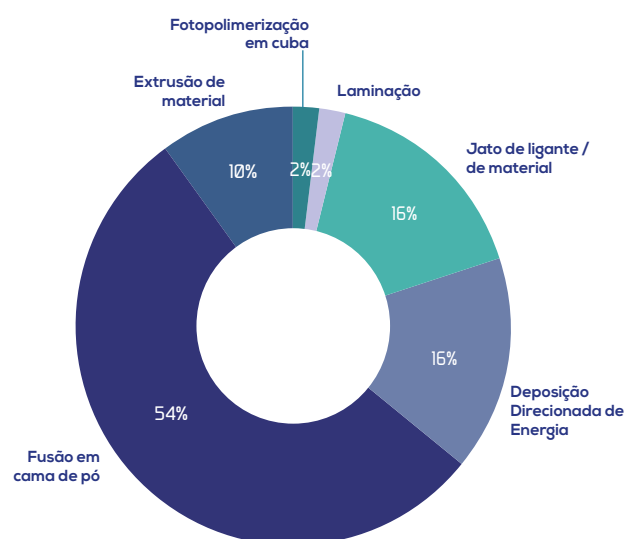


Figura 12

Classes de MA usadas para materiais metálicos em 2020 [6].

Recentemente Mousapour *et al.* [7] mostraram ser possível produzir componentes e objetos metálicos de aço inoxidável 316L e de aço com elevado teor em carbono, com propriedades mecânicas comparáveis às de objetos produzidos convencionalmente. O grupo destaca as grandes vantagens desta tecnologia: o seu custo ser relativamente baixo, comparando com outras tecnologias de MA, mas também a possibilidade de produzir componentes metálicos funcionais de geometria complexa e de pequenos lotes de produção. Para tal é ainda requisito obrigatório uma etapa de queima da componente polimérica do filamento e de sinterização do objeto para obter a peça final metálica com as propriedades mecânicas desejadas.

Manufatura aditiva na indústria Metalomecânica e casos de estudo

O setor da metalomecânica foi um dos pioneiros no uso e desenvolvimento nas tecnologias de MA, inicialmente muito ligado à prototipagem e validação de geometria de peças e produtos, antes de seguir para produção pelos processos tradicionais (maquinação, fundição, etc).

Atualmente, a MA é usada para diversos fins, desde a prototipagem, ferramentas especiais a peças funcionais, mas os fatores que são mais explorados, nos processos de MA usando metal, com mais afinco são: redução de peso, integração funcional (usar menos componentes para uma determinada peça final), geometrias complexas à semelhança com outras tecnologias de MA e redução significativa de custos tendo em conta a não necessidade de ferramentas como na maquinação tradicional. Em seguida apresentam-se alguns exemplos e casos de estudo do uso da MA na indústria metalomecânica.

A General Electric lançou anos atrás o desafio de redesenhar uma peça de aeronáutica (suporte de motor). Este desafio público para redesenhar um suporte de motor a jato metálico feita em titânio e que originalmente pesava 2033 gramas (figura 13), tornando-o 30 % mais leve, preservando a sua integridade e propriedades mecânicas como a rigidez e segurança.

Após diversas propostas, o vencedor foi um engenheiro da Indonésia, com a peça redesenhada e impressa em tecnologia DMLS conseguindo-se uma peça com apenas 327 gramas (figura 14).



Figura 13
Suporte standard de motor da GE [8].

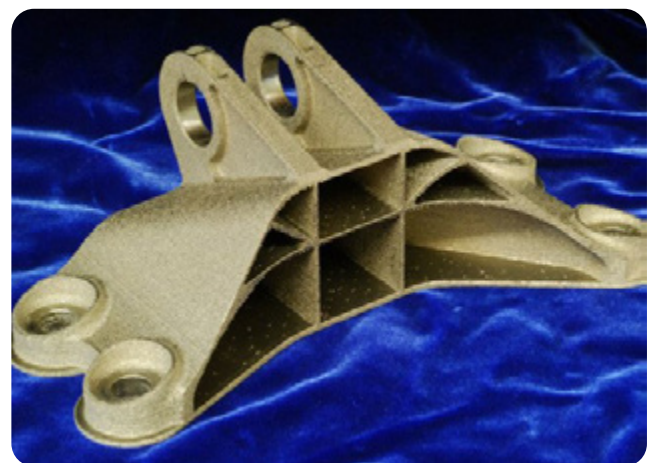


Figura 14
Suporte standard de motor da GE impressa com DMLS [8].

A simplificação de funcionalidade é permitida à medida que a tecnologia se tornar acessível a uma base mais ampla de engenheiros e designers. Isto está convenientemente ligado ao crescimento contínuo da impressão em 3D metálica como um processo de fabrico facilitador. No seguinte exemplo, uma peça que precisaria de 6 componentes soldados entre si, neste caso depois de redesenhado pode ser fabricada em MA numa única peça mais simples para a mesma função (figura 15).

A área das próteses médicas (figura 16), é um campo fértil de exemplos, onde a MA metálica preenche a necessidade de se fabricar peças com geometria muito complexas, quase impossíveis de fabricar pelos métodos tradicionais, e em curto tempo, para implantação em pacientes, onde o tempo e formas personalizadas é crucial [10].

Os impulsores são uma componente essencial em bombas para mover líquidos em diferentes sistemas em muitas e variadas indústrias. Os impulsores químicos (figura 17) são normalmente produzidos em aço inoxidável 316L devido à sua resistência química e mecânica em temperaturas extremas e é por isso usado em bombas criogénicas, água salgada e de petróleo.

Os impulsores têm normalmente um design complexo de palhetas e específico para cada líquido (dependendo da sua viscosidade) e para a sua aplicação. Por estas razões os protótipos funcionais são essenciais e são tipicamente produzidos por maquinação CNC ou por fundição. Devido à sua geometria, o custo de um protótipo produzido convencionalmente pode chegar a custar 1000\$ ou mais. Com a tecnologia FFF da Desktop Metal, o custo de um protótipo com a mesma geometria pode custar apenas 70\$ (redução de 93 %) e por isso, poderão ser testadas diferentes geometrias e desenhos a um custo bem mais baixo do que os produzidos convencionalmente, promovendo a escolha do design mais apropriado. O tempo de desenvolvimento é outro dos aspetos diferenciadores, passando de 2 semanas para 3 dias (redução de 79 %) [2].



Figura 15
Otimização e impressão 3D de componente estrutural [9].



Figura 16
Peça complexa e personalizada para traumatismo craniano [11].

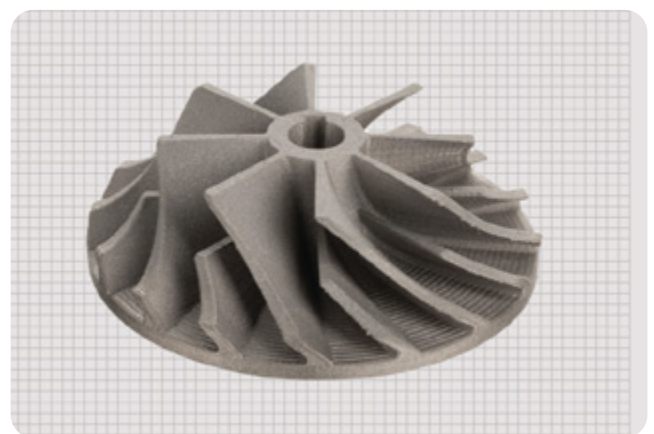


Figura 17
Impulsor químico [2].

John Zink Hamworthy Combustion é uma empresa líder no controlo de emissões e pioneira em novas tecnologias para soluções de combustão. Desde há um longo tempo que a empresa identificou o elevado potencial das tecnologias de MA e redesenhou os seus atomizadores, usados em caldeiras de propulsão a vapor, para aumentar a sua eficiência em consumo de combustível.

Apesar de os atomizadores da JZHC serem já produzidos por uma tecnologia MA de metais (figura 18), no caso DMLS, e que permitiu a redução do tempo de produção de várias semanas pelos métodos convencionais para apenas dias. O uso da tecnologia FFF da Desktop Metal permitiu também a redução do custo do protótipo (tal como descrito acima, os processos que usam laser, como o DMLS, são tipicamente mais caros que processos como o FFF) de 1089\$ para 129\$ (88%). Mais uma vez, o metal escolhido foi o aço inoxidável 316L, pelas suas excelentes propriedades mecânicas a elevadas temperaturas e resistência à corrosão em ambientes marinhos [2].

Atualmente, os mesmos atomizadores usados para prototipagem são também usados em ambiente de trabalho, com uma melhoria de quase 100% em eficiência de gasto de combustível, acompanhada por uma redução dos custos operacionais e impacto ambiental dos sistemas.

Os tacos de golfe (figura 19) têm de cumprir com muitos requisitos de design, mais especificamente o ângulo na base do taco, a forma da cavidade e o peso (e sua distribuição) do taco. Adicionalmente, o design do taco tem de ter também em consideração a anatomia e as preferências de cada jogador, tornando-o em um objeto altamente personalizável. Neste sentido o teste com protótipos funcionais é crucial.

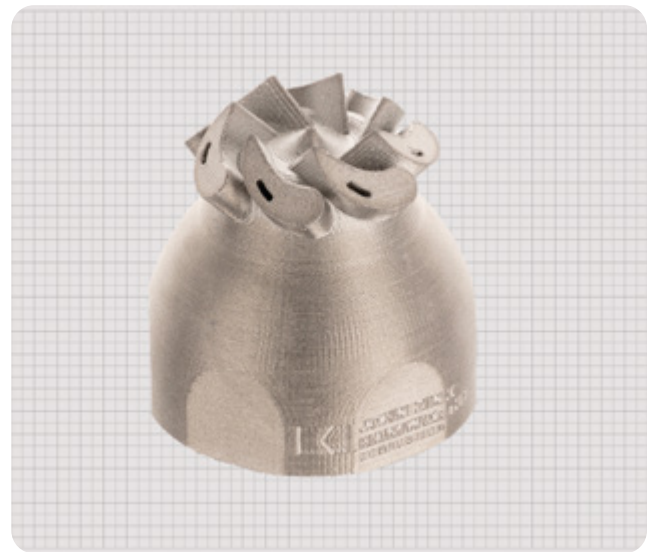


Figura 18
Atomizador de combustível [2].

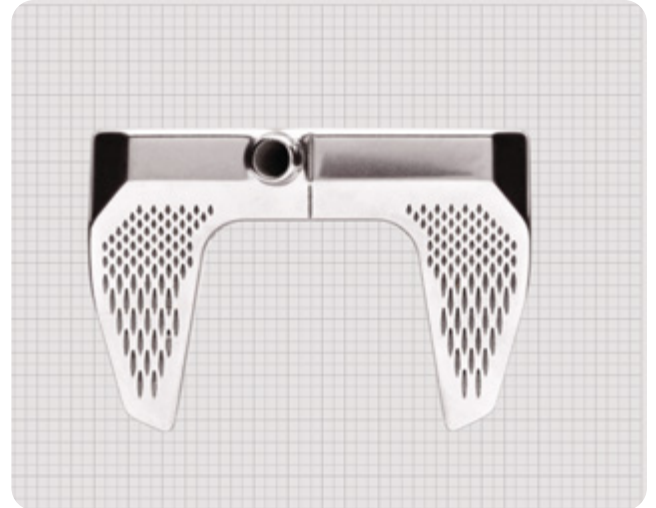


Figura 19
Tacos de golfe [2].

Atualmente o processo de desenvolvimento de um protótipo começa com um objeto padrão em forma de taco, que é em seguida maquinado até ter a forma desejada. No entanto, este processo limita em muito o desenvolvimento do protótipo por se iniciar sempre da mesma forma. Com o recurso à MA, o acesso a designs de taco completamente diferentes torna-se possível, podendo até a distribuição do peso ao longo do taco ser controlada pela quantidade de material no interior de cada secção [2].

Sendo os processos típicos na prototipagem de um taco de golfe a fundição e a forja, ambos os processos têm custos proibitivos para o desenvolvimento de protótipos. Assim, a MA aparece como uma excelente solução para abrir portas à customização em massa, podendo os designers criar e testar um elevado número de objetos e escolher o melhor design, acompanhado por uma drástica redução de tempo e de custos (94%) até atingir o mercado.

Amortecedores são essencialmente bombas hidráulicas de óleo (figura 20). Um componente fundamental para os amortecedores são as válvulas de pistão, responsáveis pela direção do fluxo de óleo durante a compressão e extensão do sistema de suspensão. O design da válvula é um fator crucial para a resposta do amortecedor e por isso, a otimização do seu desenho é crítica.



Figura 20

Válvula de pistão de amortecedores [2].

Tipicamente as válvulas são produzidas através de prensagem e de sinterização, o que por consequência, implica muitas restrições em termos de geometria, incluindo a orientação do fluxo do óleo no pistão. A tecnologia FFF da Desktop Metal permite o estudo de diferentes variações de desenho numa questão de horas ou poucos dias, acelerando o processo de desenho, e ao mesmo tempo permite a exploração de novas geometrias, como canais internos de fluxo de óleo, que serão apenas possíveis de produzir por MA. Estas vantagens são ainda acompanhadas por uma redução do custo de 245\$ para 41\$ (83%) [2].

O pistão é um componente crucial em todos os motores de combustão interna, sendo responsável por comprimir a mistura de ar e combustível que será inflamada por uma faísca.

Do ponto de vista de design (figura 21), o pistão tem de ser, em simultâneo, leve, para minimizar as forças a que está sujeito, mas resistente mecanicamente para resistir à pressão gerada durante a combustão.

Atualmente, os produtores de pistões usam maquinaria CNC para desenvolver protótipos de novas geometrias, mas a elevada complexidade geométrica de um pistão leva a que este processo seja muito moroso.

Assim, tal como em outros exemplos, a tecnologia FFF da Desktop Metal permite o rápido e mais barato desenvolvimento de protótipos de pistões com geometria complexa, reduzindo o custo de 568\$ para 271\$ (52%). Com esta tecnologia é também possível combinar as melhores propriedades de leveza e de resistência mecânica, levando a designs de pistões que poderão ser impossíveis de produzir por outras formas que não a MA [2].



Figura 21
Pistão da cabeça de motor [2].

Manufatura aditiva na indústria do Calçado e casos de estudo

Nesta secção apresentam-se alguns exemplos do uso de MA na indústria do calçado.

A MA trouxe também inúmeras vantagens à indústria do calçado, embora neste setor a MA de metais ainda não seja tão usada comparativamente aos polímeros. Atualmente, não só grandes marcas conhecidas como Adidas, Nike, New Balance, ECCO e outras se renderam à utilização desta tecnologia, como também pequenas start-up e designers de calçado com coleções próprias como por exemplo a Silvia Fadó e a Ganit Goldstein. Numa fase inicial, a MA era utilizada apenas para prototipagem, no entanto, com a evolução da tecnologia já é possível imprimir calçado funcional completo, componentes para calçado ou acessórios decorativos.

No mundo da indústria do calçado, a validação do design é um processo importantíssimo antes de lançar o produto no mercado. Esta validação é feita através da construção de protótipos a fim de avaliar o seu design e funcionalidade. O processo da construção de protótipos é lento e caro. A Stratasys, fabricante de impressoras 3D, elaborou um caso de estudo [12] juntamente com a Brooks Running, fabricante de sapatilhas de corrida. Observaram que, graças à utilização da prototipagem rápida por impressão 3D, os atrasos em projetos de desenvolvimento diminuíram drasticamente. O tipo de impressora utilizada foi polyjet. Com esta nova tecnologia, a validação de design pode ser feita em menos de metade do tempo comparativamente aos métodos tradicionais e o redesign é muito mais fácil. Kelly Krotzer da Brooks Running afirma que o próximo passo da empresa será a impressão de protótipos funcionais assim que existam no mercado materiais adequados. Andy Chung da Puma referiu que através da utilização da impressão 3D, conseguiram reduzir o tempo de produção de um protótipo em 75 % [13].

O modelo Carbonalise surgiu de uma colaboração

Silvia Fadó [14], designer de calçado espanhola, concebeu alguns modelos de calçado recorrendo à impressão FFF para a produção das plataformas como pode ser observado na figura 22.

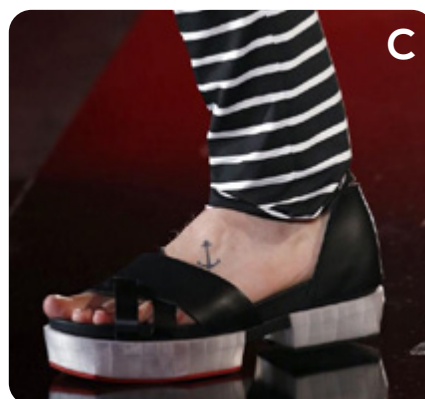


Figura 22

Coleção de calçado elaborado por Silvia Fadó

A. Carbonalise B. Lucid Matters C. Silvia Fadó X Miquel Suay [14].

entre a designer e a empresa de especialistas em impressão 3D Hxx, sendo um modelo exclusivo do festival de moda espanhol South 36.32n. A plataforma deste modelo foi produzida por FFF usando um filamento com fibras de carbono incorporadas de forma a atribuir a robustez exigida neste tipo de calçado e ao mesmo tempo mantendo a leveza. O modelo Lucid Matters, inspirado no design de calçado japonês, é composto por uma plataforma translúcida de polipropileno 100% impressa 3D. O PP foi escolhido para este modelo por proporcionar flexibilidade, leveza e a robustez necessária. Semelhante ao Lucid Matters, o modelo resultante da colaboração com Miquel Suay é composto por uma sola totalmente impressa em PP. O desenvolvimento de ambos modelos, Lucid Matters e X Miquel Suay tiveram a colaboração e apoio da empresa Smart Materials 3D, fornecedora de filamentos para impressão 3D.

ContinuumFashion [15] lançou as coleções Myth e strvct composta por sapatos de senhora produzidos por impressão FFF em nylon, figura 23. Alguns modelos necessitam de componentes extra como por exemplo palmilha de couro para um melhor conforto e sola em borracha para melhorar a tração.



Figura 23

Modelos da Continuum produzidos por impressão FFF. Esquerda: modelos da coleção Myth. Acima: modelos da coleção strvct [15].

Ganit Goldstein, desenhou e imprimiu em 3Dpolyjet alguns modelos de calçado de mulher em colaboração com a Stratasys, fabricante de impressoras 3D [16]. A coleção de calçado apresentada por Ganit foi inspirada na mistura de novas tecnologias com a técnica japonesa de tecelagem, Ikat, figura 24. Numa entrevista à ALL3DP, Ganit referiu “O meu trabalho começa com o design e produção de objetos digitais que servirão como um modelo tridimensional. Depois eu faço decorações de uma forma única através de costura manual” [17]. Numa outra entrevista, à From the Grapevine, disse também “Eu descobri que ao usar a impressão 3D, eu poderia fazer algo extremo em termos de design, algo que ninguém está a fazer” [18].



Figura 24

Modelos produzidos por Ganit Goldstein [16], [17].

Em 2019 [20], em colaboração com a Prusa Research, Ganit Goldstein lançou uma nova coleção, Custom-Fit, de sapatos e peças de vestuário recorrendo à impressão FFF, figura 25. Os sapatos foram desenvolvidos através de um scanner 3D e posteriormente impressão 3D em peça única. Desta forma, o sapato é totalmente ajustado à forma do pé do seu utilizador. No caso das peças de vestuário, Ganit e Prusa imprimiram padrões decorativos diretamente no tecido como se pode observar na figura 26.



Figura 25

Calçado decorado por impressão 3D direta em couro [19].



Figura 26

Sapatos 100 % impressos e peça de vestuário com decoração aplicada por impressão 3D, integrantes da coleção Custom-Fit resultante da colaboração entre Ganit Goldstein e Prusa Research [20].

Em 2019, a Adidas lançou no mercado umas sapatilhas de corrida cuja sola é produzida por impressão 3D [21]. Contudo, a tecnologia utilizada neste caso é a DLS (Digital Light Synthesis), onde uma resina líquida é curada através da ação de luz e oxigénio. Este produto resultou da colaboração entre a Adidas e a Carbon™, desenvolvedora da tecnologia de impressão DLS, figura 27.



Figura 27
Modelo Alphaedge 4D lançado no mercado pela Adidas [21].

Semelhante à Adidas, a New Balance em colaboração com a Formlabs [22] e a Under Armour [23], desenvolveram uma sola que, segundo o fabricante é leve e com ótimas características de suporte mantendo a elasticidade, figura 28. A tecnologia utilizada pela New Balance e Formlabs é SLA e a Under Armour é SLS.



Figura 28

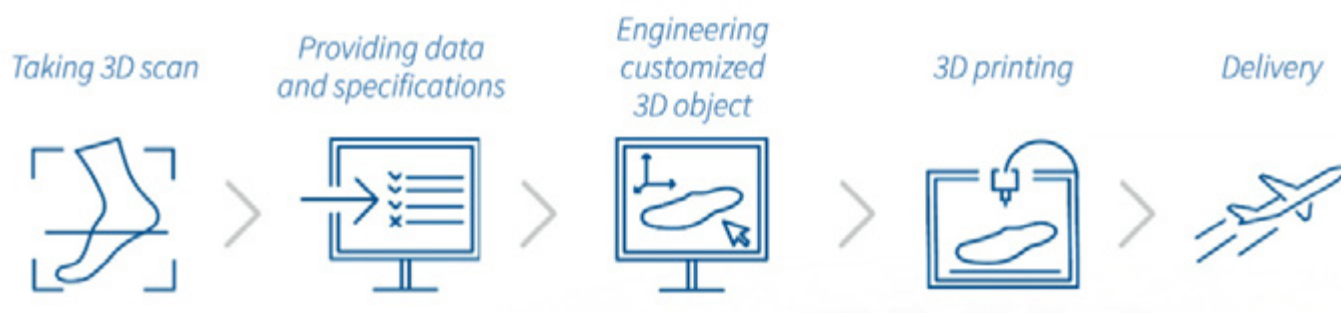
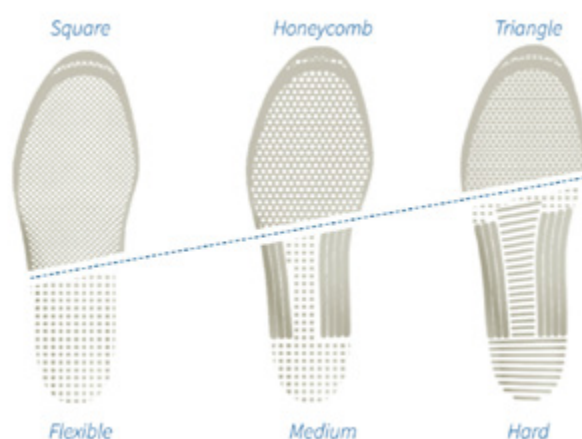
Em cima: Sapatilha desenvolvida pela New Balance em colaboração com a FormLabs (SLA) [22]; Em baixo: sapatilha da Under Armour (SLS) [23].

A Nike [24]–[26] e a ECCO [27] têm também feito investigação e desenvolvimento na área da impressão 3D com o objetivo de fornecer calçado que seja 100% ajustado à anatomia de cada individual. O ajuste perfeito à anatomia do pé é feito através de um scan 3D. A tecnologia de impressão utilizada pela Nike é a FFF. A ECCO não faz referência ao tipo de impressora 3D utilizada.

A produção de palmilhas ortopédicas é um outro exemplo onde a MA é indiscutivelmente vantajosa, dado que estes produtos são únicos e exclusivos [27][28]. Nestes casos, a anatomia do pé pode ser digitalizada através de um scanner 3D em vez do tradicional molde. Posteriormente o modelo 3D do pé é trabalho para dimensionar a palmilha para a impressão. A figura 29, proveniente do catálogo da empresa Ortho Baltic [29] mostra a possibilidade de produzir palmilhas com diferentes características, mais especificamente em termos de flexibilidade, por tecnologia de SLS, bem como uma representação esquemática do processo desde o scan do pé até à entrega ao cliente ou paciente, elevando a grande vantagem da MA que é a elevada personalização do produto. Adicionalmente, é também possível produzir formas por MA, seja para validação de design, para modelação do sapato ou mesmo para montagem de protótipos.

Figura 29

Diferentes tipos de parâmetros de impressão e a consequência na flexibilidade da palmilha e o fluxograma do processo da empresa Ortho Baltic [29].



A Desktop Metal e a EAC [30], apresentaram um caso de estudo da impressão de objetos metálicos para marroquinaria ou calçado como por exemplo fivelas, ornamentos decorativos, cliques, botões de pressão, ganchos entre outros (figura 30). Para muitas marcas, a ornamentação metálica é considerada um ponto muito importante no design de um produto, acrescentando valor. Embora as marcas de produtos de baixo custo não vejam a potencialidade da MA para os seus produtos, já as marcas premium e de luxo mostram-se interessadas pela rapidez e customização que a MA proporciona, facilitando a produção de objetos únicos e exclusivos.

Para a EAC, a utilização da MA para a produção de ornamentos metálicos tem sido um sucesso. Permitiu desenvolver ornamentos personalizados e com geometrias tão elaboradas e complexas que seriam impossíveis de fabricar pelos métodos convencionais. De acordo com a EAC, a MA permitiu também reduzir o desperdício de material durante a produção dos ornamentos, tornando o fabrico mais ecológico. Todos estes fatores levaram ao aumento da reputação da empresa, sendo agora líder no mercado de luxo e em ornamentos inovadores.

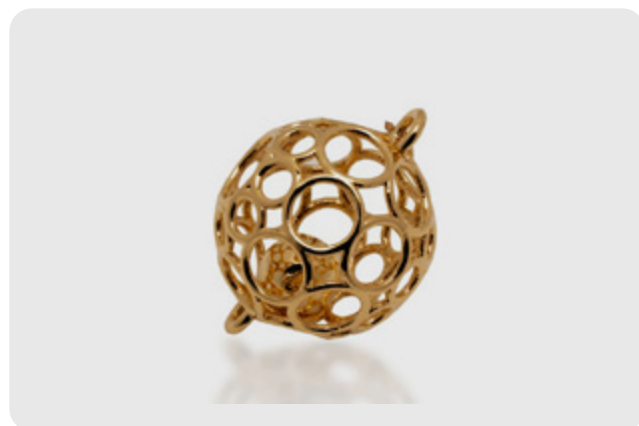
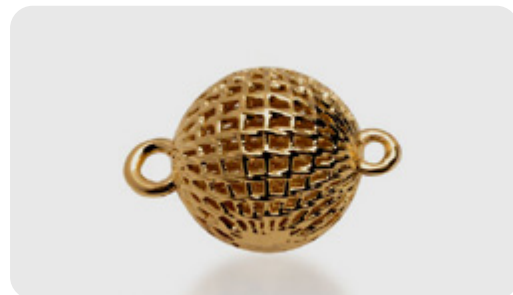
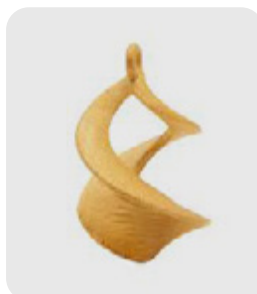
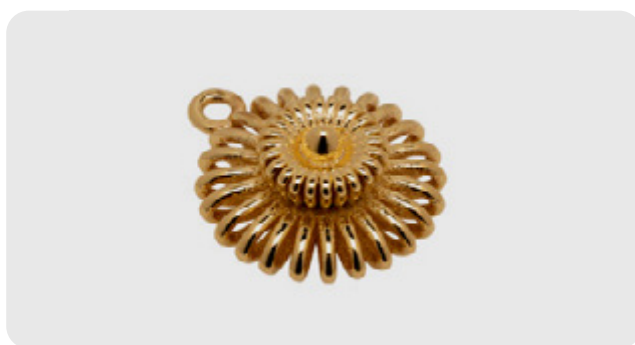


Figura 30

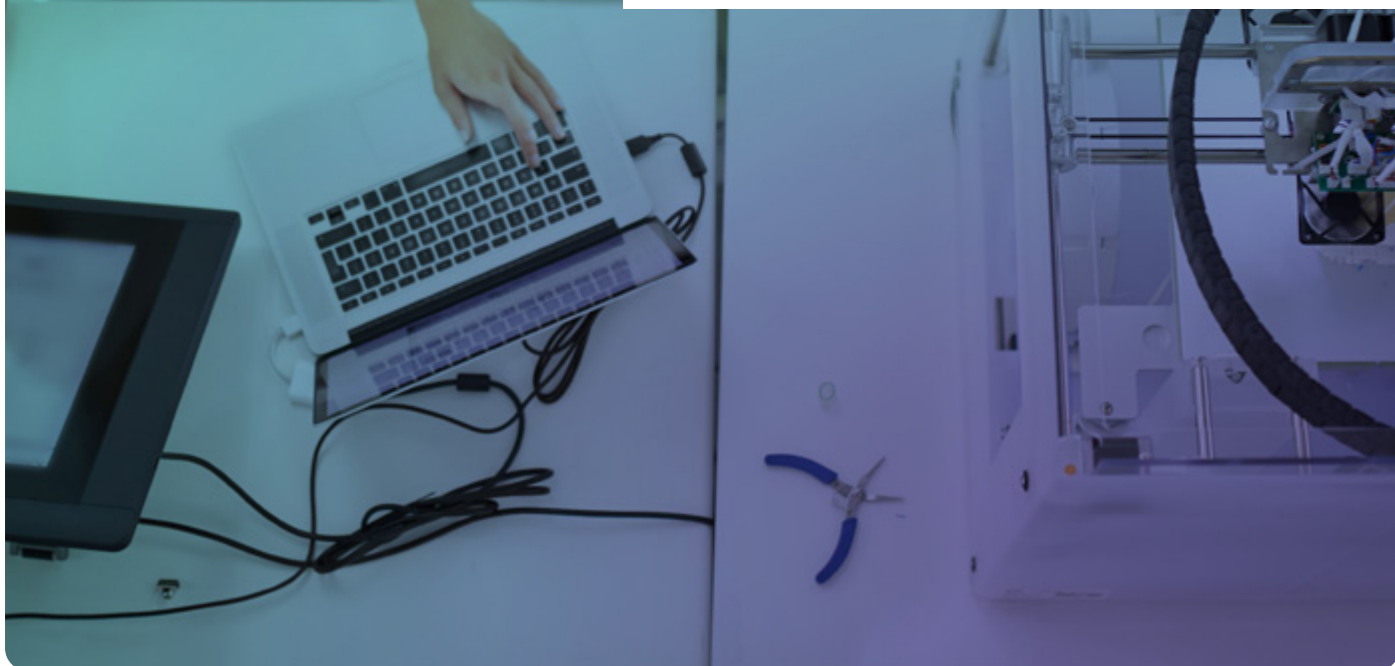
Ornamentos metálicos produzidos por MA [30].

Enquadramento no MetalShoe FabLab



Em suma, as tecnologias apresentam muitas vantagens para diversos setores industriais, materiais ou processos. Como processo produtivo, a MA poderá ainda estar longe de acompanhar os processos convencionais, seja porque as propriedades dos objetos impressos não são as desejadas, pela inadequação dos materiais industriais atuais às tecnologias ou simplesmente pelo nível de investimento não ser ainda o mais atrativo, principalmente no cluster industrial do calçado e marroquinaria. No entanto pode ser já usada em **três principais áreas, quer no setor do calçado quer no de metalomecânica:**

1. Ferramenta de apoio à produção,
2. Produção de acessórios e ornamentos funcionais,
3. Desenvolvimento de produto.



Como **ferramenta no apoio à produção**, muitas destas tecnologias permitem já imprimir objetos funcionais em diferentes materiais e que podem ser usados para substituição temporária de componentes de equipamentos avariados e assim manter a produção enquanto o novo componente não pode ser instalado ou, até mesmo substituição permanente de componentes no caso destes já não serem fabricados pelo fornecedor. Também como produção de ferramentas para sistemas de poka yoke ou acessórios com dimensões e geometrias específicas. Neste caso, tem de se ter em consideração as condições de operação a que o objeto estará sujeito e a adequação do material às mesmas.

No caso do seu uso para **produção de pequenas séries de acessórios e ornamentos**, estas tecnologias trazem oportunidades ao nível da elevada personalização. Tecnologias como SLA, MJP ou SLS permitem a produção de pequenos objetos com elevado nível de detalhe e de personalização, quer seja com materiais metálicos, resinas poliméricas ou ceras. Os fins estéticos, decorativos e ornamentais destes objetos fazem com que a sua aplicação não tenha requisitos estritos em termos de resistência mecânica ou temperatura e, portanto, podem ser já usados, potenciando uma das principais vantagens da MA: elevada personalização de objetos.

Finalmente, onde, a curto prazo, a MA pode acrescentar maior valor à indústria do calçado e marroquinaria é na etapa de **desenvolvimento de produto**. A etapa de desenvolvimento de produto pode ter um elevado custo e demorar demasiado tempo. Sabendo que na indústria da moda há novas coleções a cada estação, adicionalmente à poupança de custos, a rapidez de desenvolvimento de um novo produto pode trazer um elevado valor a nível industrial. A MA, por funcionar a partir de um modelo virtual do produto, permite rápidas iterações entre o produtor e o designer, levando a criar protótipos funcionais em apenas horas ou dias, em oposição ao modelo convencional que

pode demorar dias ou semanas, devido à necessidade de produção de ferramentas. No caso de produção de formas para planificação e validação de design, as convencionais podem pesar até 1 kg pelo método convencional, enquanto se produzidas por FFF podem ser ocas e poupar bastante material. Também solas ou palmilhas podem ser rapidamente impressas num equipamento de MA e o seu design validado, evitando assim a produção de um molde para um determinado design que poderá não ser ainda o final. Adicionalmente, a MA traz uma elevada liberdade criativa durante a conceção do produto, evitando uma grande parte de constrangimentos de design que outros processos têm inerentes ao seu princípio de funcionamento.

Ainda que a produção a nível industrial de componentes de calçado por MA seja ainda apenas um nicho de mercado, há já grandes marcas a usar a tecnologia para produção de pequenas séries de produtos. Espera-se que com o desenvolver dos materiais e das tecnologias, a produção em massa por MA possa vir a ser uma realidade a médio prazo.

No âmbito do Metalshoe FabLab pretende-se dar apoio às empresas dos clusters do calçado e da metalomecânica. Para isso, os FabLabs do CTCP e do CATIM têm instaladas as seguintes tecnologias:

DMLS – permite fabricar pequenas peças, para prototipagem e/ou funcionais em aço inoxidável (316L).

FFF – permite fabricar peças com dimensões até 300x400x420 mm, duplo extrusor, em materiais de base polimérica, rígidos e flexíveis como por exemplo PLA, ABS, PETG e TPU.

Neste sentido pretende dar-se apoio no estudo dos parâmetros de impressão, de limites de design (figura 31) e de potencialidades em termos de complexidade de formas (figura 32).

Adicionalmente, o FabLab do CTCP está também equipado com um **tritador e extrusor que permite a reciclagem de materiais** de base polimérica para **produção de novo filamento** para as impressoras de FFF. Estes equipamentos permitem também formular novos materiais.

Sumarizando, a MA apresenta uma grande versatilidade em termos de tecnologias, materiais, aplicações e indústrias. Seja para a indústria do calçado ou para todas as outras como é o caso da metalomecânica e metalurgia, a MA vem trazer vantagens e preencher lacunas que as metodologias convencionais apresentam, como pequenas séries de produção, personalização de produtos ou redução de desperdício de materiais.



Figura 31
Experiência de impressão de saliências com diversas inclinações para estudo de limitações de design.

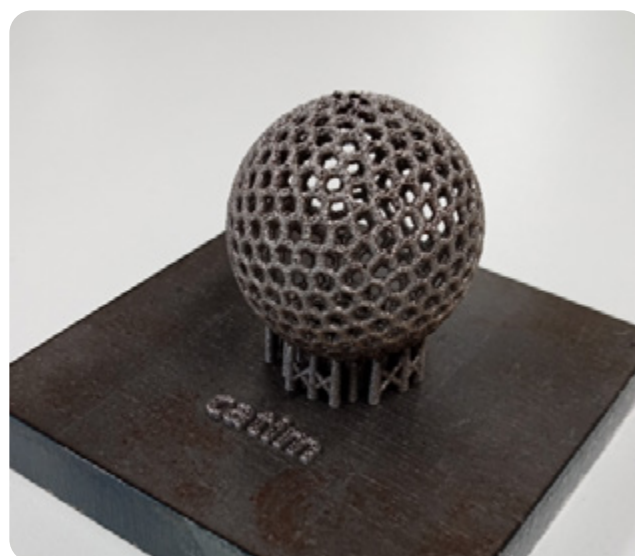


Figura 32
Peça de geometria complexa produzida por DMLS.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Duarte, P (2021). "Production of porcelain parts by additive manufacturing." Universidade de Aveiro
- [2] Desktop Metal, "Functional Prototyping using Metal 3D Printing." pp. 1-10, 2020.
- [3] ASTM International, "ASTM F2792-12a - Standard terminology for additive manufacturing technologies." pp. 1-3, 2012
- [4] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," Mater. Today, vol. 21, no. 1, pp. 22-37, 2018
- [5] S. Pratheesh Kumar, S. Elangovan, R. Mohanraj, and J. R. Ramakrishna, "Review on the evolution and technology of State-of-the-Art metal additive manufacturing processes," Mater. Today Proc., 2021
- [6] A. Vafadar, F. Guzzomi, A. Rassau, and K. Hayward, "Advances in metal additive manufacturing: A review of common processes, industrial applications, and current challenges," Appl. Sci., vol. 11, no. 3, pp. 1-33, 2021
- [7] M. Mousapour, M. Salmi, L. Klemettinen, and J. Partanen, "Feasibility study of producing multi-metal parts by Fused Filament Fabrication (FFF) technique," J. Manuf. Process., vol. 67, no. April, pp. 438-446, 2021
- [8] <https://www.ge.com/news/reports/jet-engine-bracket-from-indonesia-wins-3d-printing>, acedido em Dezembro de 2021
- [9] <https://www.pddinnovation.com/the-future-of-3d-printing-for-medical-applications-additive-manufacturing-opportunities-realised/>, acedido em Dezembro de 2021
- [10] M. Salmi, "Additive Manufacturing Processes in Medical Applications," Materials (Basel), vol. 14, no. 1, p. 191, 2021
- [11] <https://3dprint.com/52354/3d-print-medical-implants/>, acedido em Dezembro de 2021
- [12] <https://www.stratasys.com/resources/search/case-studies/brooks-running>, acedido em Junho de 2021
- [13] <https://www.3ders.org/articles/20130308-how-3d-printing-impacts-puma-and-reebok-in-designing-and-prototyping.html>, acedido em Junho de 2021
- [14] <http://www.silviafado.com/collections>, acedido em Junho de 2021
- [15] <http://www.continuumfashion.com/>, acedido em Junho de 2021
- [16] <https://ganitgoldstein.myportfolio.com/3d-printed-shoes>, acedido em Junho de 2021

- [17] <https://all3dp.com/fashion-design-graduate-takes-major-step-woven-3d-printed-shoes/>, acessado em Junho de 2021
- [18] <https://www.fromthegrapevine.com/innovation/ganit-goldstein-bezalel-fashion-shoe-design-tech>, acessado em Junho de 2021
- [19] <https://3dprintingzoom.com/2019/05/06/ganit-goldstein-collaborated-with-stratasys-on-new-style-assortment-of-3d-printed-jewellery-and-footwear/>, acessado em Junho de 2021
- [20] <https://3dprint.com/257261/ganit-goldstein-prusa-wearable-collection-of-3d-printed-shoes-and-outfits/>, acessado em Junho de 2021
- [21] <https://www.adidas.pt/alphaedge>, acessado em Junho de 2021
- [22] <https://formlabs.com/blog/new-balance-formlabs-continuous-innovation/>, acessado em Junho de 2021
- [23] <https://www.underarmour.com/en-us/3d-architech>, acessado em Junho de 2021
- [24] <https://www.engadget.com/2018/04/17/nike-flyprint/>, acessado em Junho de 2021
- [25] <https://news.nike.com/news/nike-flyprint-3d-printed-textile>, acessado em Junho de 2021
- [26] <https://news.nike.com/news/allyson-felix-track-spike>, acessado em Junho de 2021
- [27] <https://www.orthobaltic.eu/3d-printing.html>, acessado em Junho de 2021
- [28] <https://www.3dprintingmedia.network/covers-3d-printed-orthopedic-insoles/>, acessado em Junho de 2021
- [29] https://www.orthobaltic.eu/catalogues/3D-PRINTED-INSOLES_EN/, acessado em Dezembro de 2021
- [30] Desktop Metal, "Case Study - Metal Ornaments." pp. 1-20, 2020.



METALSHOE

FABLAB NETWORK