

A Manufatura Aditiva na Indústria 4.0: uma Revisão

Gustavo Harro Wehle (Universidade Estadual de Santa Catarina) gustavo.wehle@gmail.com

Diogo José Horst (Universidade Federal de São Paulo) diogohorst@gmail.com

Charles Adriano Duvoisim (Universidade Federal de São Paulo) charlesadrianoduvoisim@gmail.com

Rogério de Almeida Viera (Universidade Federal de São Paulo) rogerioaviera@gmail.com

Resumo:

Indústria 4.0 é a recente mudança para a tecnologia de automação inteligente. Nesta nova era, o uso das habilidades modernas da Manufatura Aditiva (MA) dentro do contexto da integração da tecnologia da informação, desempenham um papel importante na competitividade econômica industrial. Esta breve revisão fornece uma compreensão básica do papel da tecnologia 3D na Indústria 4.0. A revisão bibliográfica foi realizada buscando artigos nos bancos de dados científicos: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO e Google Scholar. Como pode ser visto, não há dúvidas de que as tecnologias 3D estão levando à próxima grande revolução industrial. Devido a sua versatilidade, a Manufatura Aditiva desempenha um papel-chave na Indústria 4.0, como: economizar tempo e reduzir custos, aumentando eficiência e reduzindo a sua complexidade e assim permitindo uma prototipagem rápida em processos de produção altamente descentralizados. Atualmente, cada vez mais segmentos industriais estão adotando a MA. As fábricas inteligentes do futuro têm todos os processos interligados pela Internet das Coisas, incorporando maior flexibilidade e individualização dos processos de fabricação.

Palavras chave: Impressão 3D, Indústria 4.0, Produção Processo, Fábrica inteligente.

The Additive Manufacturing at Industry 4.0: a Review

Abstract:

Industry 4.0 is the recent move into intelligent technology automation. In this new era the use of modern skills of Additive Manufacturing within the context of information technology integration plays an important role in industrial economic competitiveness. This short review provides a basic understanding of the role of 3DP technology in the Industry 4.0. The bibliographic review was performed searching in the Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO and Google Scholar scientific databases. As can be seen, there's no doubt that 3DP technologies are leading to the next major industrial revolution. Due its versatility the Additive Manufacturing plays a key-role in the Industry 4.0, saving time and costs, being decisive for process efficiency and reducing its complexity, allowing for rapid prototyping and highly decentralized production processes. Currently, more and more industrial segments are adopting AM. The smart factories of the future have all processes interconnected by the Internet of Things, incorporating greater flexibility and individualization of manufacturing processes.

Key-words: 3D Printing, Industry 4.0, Production Process, Smart factory.

1. Introdução

Uma cadeia de produção consiste no processo de transformar matérias-primas em commodities. No entanto, muitas etapas são necessárias para converter os recursos disponíveis em produtos, como design, planejamento, fabricação e vendas. Recentemente, os processos da cadeia de produção vêm mudando, uma vez que a tecnologia de manufatura aditiva (MA) ou 3DP (*tridimensional printing*) transformou suas características. Produtos personalizados com geometrias difíceis podem ser projetados e impressos com a ajuda da tecnologia aditiva. Assim, facilitando a manufatura dos produtos, fazendo com que os mercados possam ser abastecidos em imediato, sem ter um custo de armazenagem, assim reduzindo a despesa da empresa. (MAVRI, 2015).

Embora ainda existam dúvidas sobre sua aplicação deste processo na produção em massa, o uso da MA na Indústria 4.0 está em alta, devido aos seus recentes avanços. Sendo uma tecnologia em desenvolvimento para criar objetos precisos com alta velocidade de produção, oferecendo uma maneira de substituir as técnicas de fabricação convencionais em um futuro próximo. Graças à alta qualidade de fabricação do produto, a MA está sendo usado atualmente em vários setores, incluindo o aeroespacial, biomédico e também na área alimentícia (THOMPSON et al., 2016).

A digitalização e a “inteligentização” do processo de manufatura são necessários na indústria atual. As indústrias manufatureiras estão atualmente mudando da produção em massa para a produção customizada. Os rápidos avanços tecnológicos de, ajudam a aumentar a produtividade nas indústrias (ZHOU, 2013).

O termo Indústria 4.0 representa a quarta revolução industrial, que é definida como um novo nível de organização e controle sobre toda a cadeia de valor do ciclo de vida dos produtos. Ele é voltado para clientes que precisam de peças individuais, pois o seu setup é muito mais rápido e eficiente que uma linha de produção. A final o termo Indústria 4.0 ainda é visionário, porém realista, o qual inclui: Internet das Coisas, Internet Industrial, Manufatura Inteligente, e plataforma industrial baseada na nuvem. A Indústria 4.0 diz respeito à integração precisa do ser humano no processo de fabricação, de modo que tenha uma melhoria contínua e um aumento do foco em atividades que agreguem valor ao processo, evitando desperdício de tempo (VAIDYA et al., 2018).

A parte física das fábricas inteligentes é limitada pela capacidade dos sistemas de manufatura existentes. Desta forma, devido à necessidade de customização em massa na indústria 4.0, novos métodos de fabricação não tradicionais são constantemente desenvolvidos. Assim, a MA tornou-se uma tecnologia fundamental para fabricar produtos personalizados devido à sua capacidade de criar objetos sofisticados com atributos avançados (WANG & WANG, 2016).

A Figura 1 mostrada a seguir apresenta uma comparação entre os processos industriais convencionais e o processo 3D:

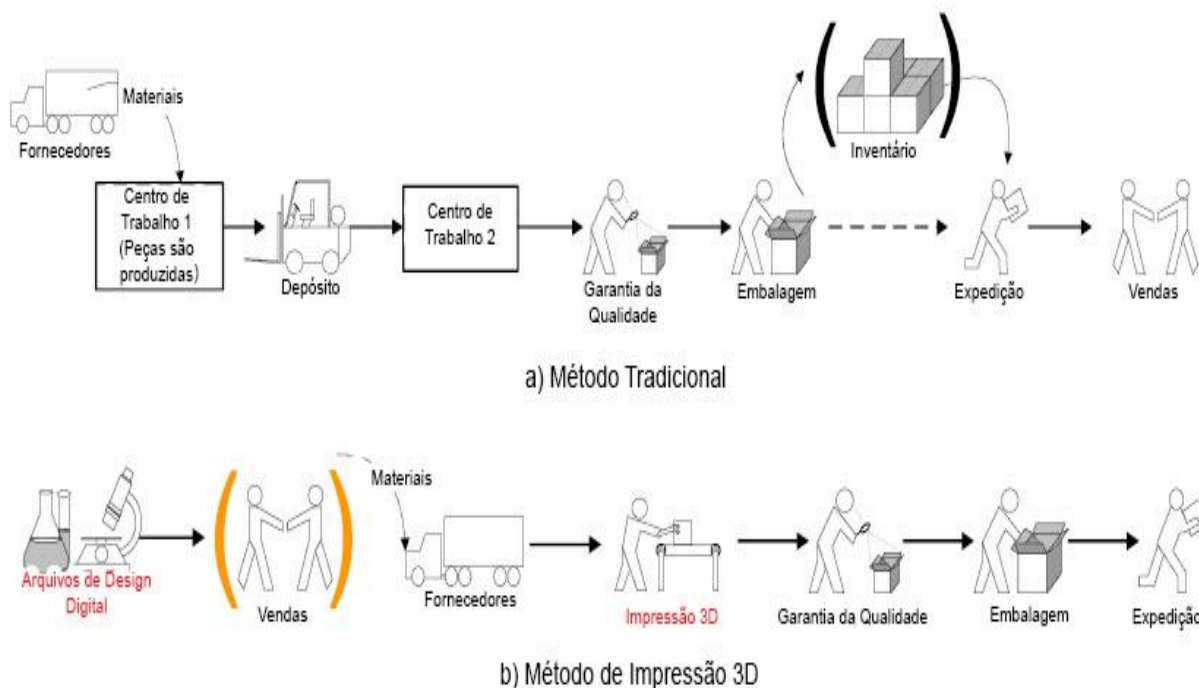


Figura 1 – O procedimento clássico (a) e o procedimento 3DP (b)

Fonte: Adaptado de Mavri (2015)

A principal vantagem da MA se comparado a manufatura tradicional, é, a capacidade de projetar e desenvolver produtos. Apesar de certas limitações, as empresas estão usando cada vez mais a MA para usufruir dos seus benefícios, dentre eles, a geração de produtos com alta complexidade para a manufatura livre. Na manufatura tradicional, existe uma relação direta entre a complexidade e os custos de fabricação (LINDEMANN et al., 2012).

Projetos destinados à manufatura tradicional são frequentemente limitados por altos custos de construção e fabricação de ferramentas. A maior liberdade do projeto através da MA é combinar uma montagem de peça por peça, reduzindo assim principalmente o tempo de montagem e consequentemente os custos de produção, além disso, diminuindo o número de processos para montagem final do produto desejado. (HOPKINSON et al., 2006).

A tecnologia 3D está emergindo como revolucionária, com uma gama de novas aplicações. Do seu ponto de vista fundamental, leva em conta os materiais disponíveis, a velocidade de fabricação e a resolução dos processos 3D, os quais devem ser considerados para cada aplicação específica (LEE, et al., 2017). Atualmente existem máquinas que permitem a impressão de produtos 3D por diversas técnicas: extrusora (filamento fundido), agente químico (aglutinante) ou laser (sinterização/fusão) (BIRTCHNELL & URRY, 2013).

A indústria 4.0 é a recente mudança dos métodos de produção tradicionais para a tecnologia de automação inteligente. Nesta nova era o uso de habilidades modernas de MA no contexto da integração na tecnologia da informação desempenha um papel importante na competitividade econômica industrial. Dentro deste contexto, esta breve revisão fornece uma compreensão básica dos fundamentos da tecnologia 3D na Indústria 4.0. A revisão bibliográfica foi realizada buscando por artigos científicos nas bases Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SciELO e Google Scholar.

2. Revisão de Literatura

2.1 Materiais 3DP

Liberdade de design, personalização em massa, minimização de resíduos e a capacidade de fabricar estruturas complexas são, os principais benefícios da manufatura aditiva. O estado atual do desenvolvimento de material 3D inclui o uso de ligas metálicas, compósitos poliméricos, cerâmicas, madeira, fibras e compósitos, concreto entre vários outros (NGO, 2018). A tecnologia abrange uma ampla gama de materiais utilizados em uma variedade de indústrias incluindo: aeroespacial, automotiva, odontológica, joalheria, petróleo e gás, ortopedia impressa eletrônica e ferramental (DUDA & RAGHAVAN, 2016). A Figura 2 apresenta uma visão geral dos principais materiais mais utilizados na AM:

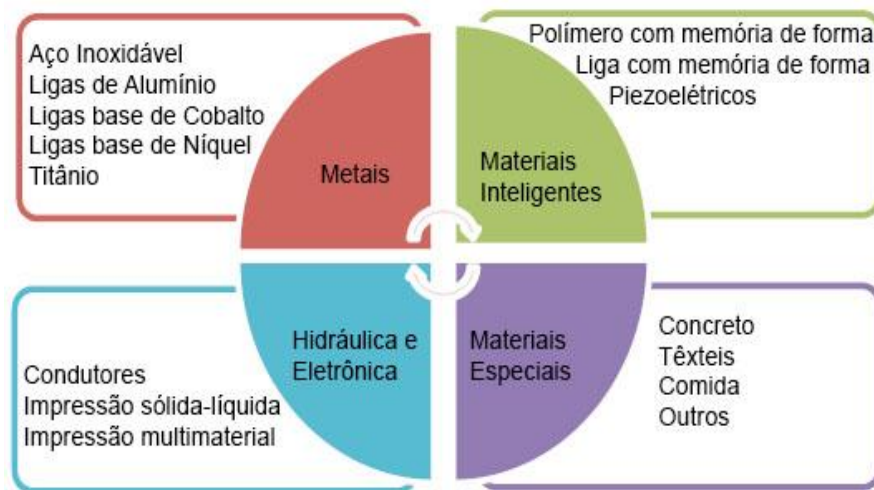


Figura 2 - Visão geral dos materiais e métodos atualmente utilizados na manufatura aditiva

Fonte : Adaptado de Dilberoglu et al., (2017).

Os componentes considerados para avaliar o custo da fabricação aditiva são: custo de material, custo de mão de obra, custo da máquina e consumo de energia. O material que gera maior custo para ser produzido na fabricação aditiva é o processo de sinterização a laser (THOMAS & GILBERT, 2014).

Dentro da MA os metais começaram a ganhar destaque em diversas aplicações tais como: aeroespacial, óleo e gás, área marítima, automotivo, fabricação de utensílios médicos e isso principalmente se deve as vantagens oferecidas por esse processo. Cada peça fabricada pela MA pode ser única e produzida em um tempo mais curto, o que permite diversas customizações. A MA também reduz os requisitos de montagem integrando o número de peças necessárias em uma única peça. Reduz o peso total, diminui o tempo e reduz o número de processos de fabricação, reduz os custos de material e aperfeiçoando as propriedades mecânicas necessárias (BHAVAR et al., 2014).

Recentemente, uma das áreas ativamente pesquisada está na fabricação aditiva de materiais e estruturas inteligentes, os quais que têm a capacidade de alterar sua forma ou propriedades sob a influência de estímulos externos. Com a introdução de materiais inteligentes, os componentes fabricados por MA são capazes de alterar sua forma ou propriedades ao longo do tempo (a quarta dimensão) como uma resposta aos estímulos externos aplicados. Isso deu origem a um novo termo chamado *4-dimensional printing* (4DP), incluindo a reconfiguração estrutural ao longo do tempo (KHOO et al., 2015).

2.2 Tecnologia de Processos 3D

Recentemente, a impressão tridimensional (3D) está em destaque, por ser uma grande promessa para processar quase todos os tipos de desenhos CAD de peças estruturais. Vários processos 3DP são disponíveis incluindo a modelagem de deposição fundida (FDM), sinterização seletiva a laser (SLS), estereolitografia (SL), fotopolimerização (PPT), entre outros (HONG et al., 2018). A Figura 3 mostra os processos mais utilizados atualmente na impressão 3D:

	Material Extrusion	Vat Photo-polymerization	Material Jetting	Binder Jetting	Powder Bed Fusion	Direct Energy Deposition	Sheet Lamination
Scheme							
Process	Layer by layer deposition of molten material	Selective curing of photo-curable material in a liquid container	Material deposition and subsequent curing	Selective dispense of binder for joining powder in a bed	Fusing of powder in a bed by melting the selected region	Direct fusion of the material	Bonding of individual sheets of material
Name	FDM RC MJS SFF	SLA DLP LAMP 2PP	DOD MJ NPJ	BJ	SLS SLM DMLS EBM MJF	LENS EBAM DMT	LOM UC

Figura 3 - Categorização dos processos de AM no estado da arte atual

Fonte: Dilberoglu et al., (2017).

O princípio básico do processo SL é a fotopolimerização, que é o processo em que um monômero líquido ou um polímero se converte em um polímero solidificado pela aplicação de luz ultravioleta que atua como um catalisador para as reações. Esse processo também é chamado de cura ultravioleta (PHAM & JI, 2000).

O Prometal é um processo 3D para construir ferramentas injetadas. Este é um processo baseado em pó no qual o aço inoxidável é usado. O processo de impressão ocorre quando um ligante líquido é lançado em jatos em forma contendo de pó de aço (COOPER, 2001). Já o SLS é um processo 3D no qual um pó é sinterizado ou fundido pela aplicação de um feixe de laser de dióxido de carbono (HWA-HSING et al., 2011; SALMORIA et al., 2011).

O FDM é um processo 3D no qual um filamento fino de plástico alimenta uma máquina onde uma cabeça de impressão o derrete e o expulsa em uma espessura tipicamente de 0,25 mm. Os materiais usados neste processo são policarbonato (PC), acrilonitrila butadieno estireno (ABS), polifenilsulfona (PPSF), misturas PC-ABS e PC-ISO, que é um PC de grau médico. As principais vantagens deste processo são que nenhum pós-processamento químico é necessário, sem resinas para curar, máquinas mais baratas e materiais que resultam em um processo mais econômico (NOORANI, 2006; KRUTH, 1991).

As desvantagens são que a resolução no eixo z é baixa em comparação com outros processos de fabricação de aditivos (0,25 mm), portanto, se uma superfície lisa é necessária, um processo de acabamento se torna necessário, o qual é um processo lento e leva dias para

construir grandes peças complexas (WONG & HERNANDEZ, 2012). Para economizar tempo, alguns modelos permitem dois modos; um modo totalmente denso e o outro esparsos, o qual economiza tempo, mas obviamente reduz as propriedades mecânicas (MORVAN et al., 2005).

A fusão por feixe de elétrons (EBM) é um processo que derrete o pó usando um feixe de elétrons alimentado por uma alta tensão, normalmente de 30 a 60 kV. O processo ocorre em uma câmara de vácuo para evitar problemas de oxidação, pois é destinado à construção de peças metálicas. Fora isso, o processo é muito semelhante ao SLS. A EBM também pode processar uma grande variedade de metais pré-ligados. Um dos usos futuros deste processo é a fabricação no espaço exterior, pois tudo é feito em uma câmara a vácuo (MURR et al., 2012; SEMETAY, 2007).

A Polyjet é um processo da MA que usa tecnologias de jato de tinta para fabricar modelos físicos. A cabeça do jato de tinta se move nos eixos X e Y, depositando um fotopolímero que é curado por lâmpadas ultravioletas após cada camada ter terminado. A espessura da camada obtida neste processo é de 16 μm , portanto, as peças produzidas têm uma alta resolução. No entanto, as peças produzidas neste processo são mais fracas do que outras, como a estereolitografia e a sinterização seletiva a laser. Utiliza-se um polímero tipo gel para suportar as características salientes e, após o processo estar terminado, este material é jateado com água. Este processo se caracteriza por usar uma infinidade de cores (SINGH, 2011; PETROVIC et al., 2011).

Vale ressaltar que a 3DP multi-material está ganhando atenção devido a uma ampla variedade de possibilidades oferecidas, especialmente impulsionada pela disponibilidade comercial de uma ampla variedade de materiais e filamentos não convencionais. Como resultado, é possível imprimir modelos sem ter limitações estéticas, gerando uma maior funcionalidade ao processo e com isso, se obtém um setup personalizado para cada tipo de peça (LIGON et al., 2017; GONZALEZ et al., 2018).

O uso de técnicas de MA mostrou-se vantajoso para peças que possuem uma alta taxa de compra, têm uma forma complexa, alto custo de matéria-prima, é usado para usinagem de sólidos e são difíceis de usar. O custo específico do material depositado pelos sistemas de manufatura aditiva necessária para fornecer uma economia de 30% sobre a máquina convencional (ALLEN, 2006; LIM et al., 2016).

2.3 A Manufatura Aditiva na Indústria 4.0

O termo Indústria 4.0 possui muitos significados, pode-se descrever fábricas inteligentes como os processos interconectados pela Internet das Coisas. Os primeiros avanços nesse campo envolveram a incorporação de maior flexibilidade e individualização dos processos de fabricação (LUQUE et al., 2017).

O paradigma da Indústria 4.0 é essencialmente delineado por três dimensões: (1) integração horizontal em toda a rede de criação de valor, (2) engenharia de ponta a ponta em todo o ciclo de vida do produto, e (3) integração vertical e rede sistemas de manufatura (STOCK & SELIGER, 2016).

A Indústria 4.0 está incentivando a integração de sistemas inteligentes de produção e tecnologias avançadas de informação. A manufatura aditiva é considerada um requisito essencial nesse novo movimento (DILBEROGLU et al., 2017). Na Indústria 4.0, o uso da tecnologia 3D será decisivo para a eficiência do processo e redução da complexidade, permitindo a prototipagem rápida com a produção altamente descentralizada. O modelo do

produto poderia simplesmente ser enviado para o local de 'impressão' mais próximo do cliente, eliminando etapas intermediárias de fabricação, principalmente o transporte e armazenagem (SANTOS et al., 2017).

Conforme mostrado na Figura 4, a Indústria 4.0 oferece sistemas físicos e cibernéticos para cooperar de forma lucrativa com o objetivo de construir fábricas inteligentes, redefinindo o papel dos seres humanos:

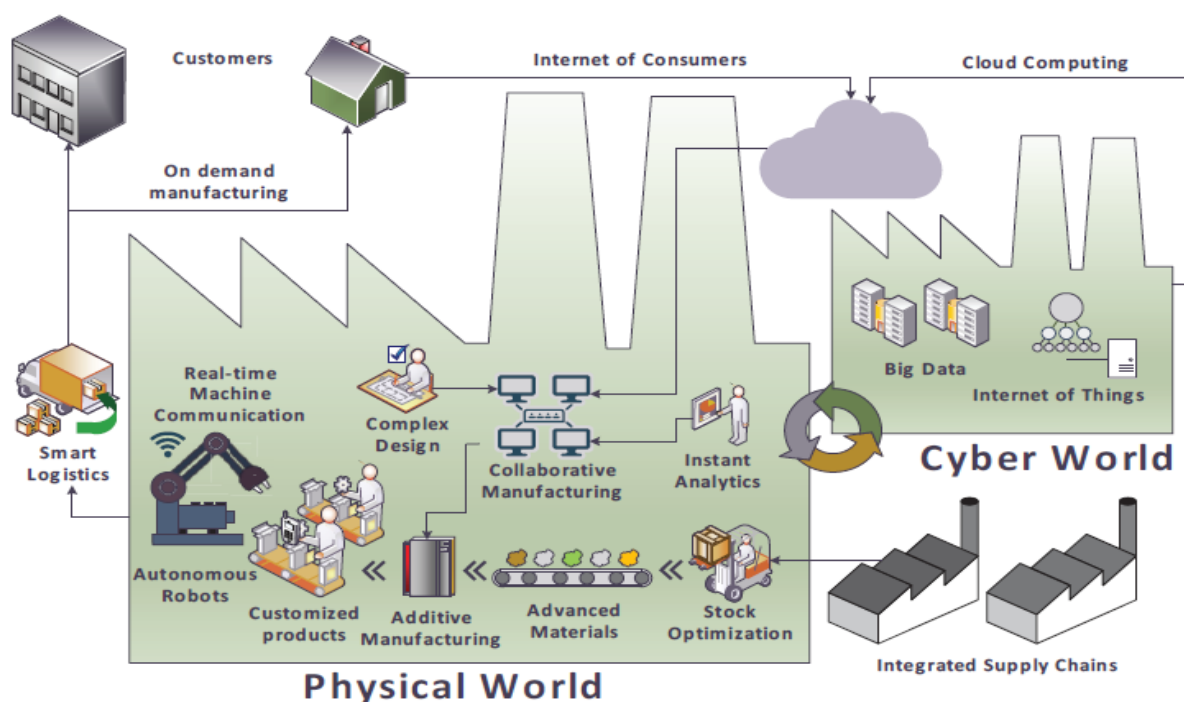


Figura 4 - Esquema de fábricas inteligentes com propriedades gerais exigidas na Indústria 4.0

Fonte: Dilberoglu et al., (2017)

A Tabela 1 fornece uma visão geral das principais características para geração de valor na indústria 4.0:

TABELA 1 – CRIAÇÃO DE VALOR NA INDÚSTRIA 4.0

Equipamento	Os equipamentos de fabricação serão caracterizados por obter um alto nível de automação, os quais vão ser capazes de se adaptar de forma flexível às mudanças de planejamento estratégico, por exemplo: os robôs estarão trabalhando em conjunto com os trabalhadores para realizar as suas tarefas (KAGERMANN, et al., 2015)
Humano	Os trabalhos de manufatura atuais estão enfrentando um alto risco de serem automatizados em grande escala, assim, diminuindo o número de trabalhadores. Os trabalhos de manufatura remanescentes terão que dispor de mais conhecimento, bem como, com mais tarefas difíceis com menos tempo para planejar (SPAT et al., 2013). Cada vez mais, os trabalhadores precisam monitorar os equipamentos automatizados e estão tendo que tomar próprias decisões, assim descentralizando a tomada de decisão da empresa (STOCK & SELIGER, 2016).
Organização	Tecnologias de fabricação aditiva, também conhecida como impressão 3D, gerarão cada vez mais valor no processo, uma vez que os custos da manufatura aditiva vão caindo rapidamente nos últimos anos e, aumentando simultaneamente em termos de velocidade e precisão. Isso permite projetar geometrias mais complexas, mais fortes e mais leves, bem como a aplicação para quantidades e escalas maiores dos

Processo	produtos STOCK, & SELIGER, G 2016). Tecnologias de fabricação aditiva, também conhecidas como impressão 3D, serão cada vez mais implementadas na criação de valor dos processos, uma vez que os custos da manufatura aditiva vêm caindo rapidamente nos últimos anos e aumentando simultaneamente em termos de velocidade e precisão. Isso permite projetar geometrias mais complexas, mais fortes e mais leves, bem como a aplicação de manufatura aditiva para quantidades maiores e escalas maiores do produto (HAGEL et al., 2015).
Produto	Os produtos serão fabricados em tamanho de lote proporcional com as necessidades individuais do cliente (STOCK, T.; & SELIGER, G 2016). Esta customização em massa do produto se integra ao cliente final o mais cedo possível, agregando valor. O produto físico também será combinado com novos serviços que oferecem funcionalidade e acesso em vez de propriedade do produto para o cliente, como parte de novos modelos de negócio HAGEL, et al., 2015).

Fonte: Adaptado de Hagel et al., (2015)

Tabela 1 – Criação de valor na Indústria 4.0

2.4 Industrialização da tecnologia 3DP

Atualmente as empresas de desenvolvimento de produtos, enfrentam desafios cada vez mais complexos para criar os seus produtos. Os clientes solicitam cada vez mais por produtos com os preços mais baixos, cada vez mais inovadores e personalizados e, com alta qualidade. Além disso, a vida útil dos produtos diminui, forçando as empresas a encurtarem seu tempo de desenvolvimento e comercialização (SPECHT, et al., 2002).

Devido a globalização, a competitividade aumenta mais a cada dia. Os limitadores dos mercados estrangeiros dificultam a manutenção das quotas de mercado alcançadas pelas empresas (BULLINGER, 1994). Uma solução para aumentar a inovação é desenvolver uma tecnologia de produção mais eficiente, ou seja, usar a manufatura aditiva (LINDEMANN et al. 2012). Atualmente, a tecnologia de MA está se tornando gradualmente a tecnologia central (CHEN et al. 2017) e existe um consenso que, as tecnologias de impressão 3D serão as próximas grandes revoluções tecnológicas (RAYNA & STRIUKOVA, 2016).



Figura 5 - O procedimento 3DP no futuro

Fonte: Adaptado de Mavri (2015)

Algumas aplicações da tecnologia 3D em diversos segmentos industriais estão listadas abaixo:

Indústria Farmacêutica: espera-se que a 3DP seja uma tecnologia altamente revolucionária dentro da indústria farmacêutica 4.0. Em particular, os principais benefícios da 3D estão na produção de pequenos lotes de medicamentos, cada um com dosagens, formas, tamanhos e características de liberação personalizadas. Desta forma, a fabricação de medicamentos personalizados se torna uma realidade. No curto prazo, a 3DP poderia ser estendido ao longo do processo de desenvolvimento de medicamentos, desde o desenvolvimento pré-clínico e ensaios clínicos até o atendimento médico de primeira linha (TRENFIELD et al., 2018).

A exploração das tecnologias emergentes da indústria farmacêutica 4.0 facilita a criação de valor sustentável, leva a uma indústria farmacêutica mais ágil, inteligente e personalizada e, em longo prazo, permite que as empresas farmacêuticas obtenham vantagens competitivas. Uma cadeia de suprimentos farmacêuticos mais sustentáveis deve ser implementada para combinar operações futuras aos gerenciamentos de produtos farmacêuticos durante todo o seu ciclo de vida (DING, 2018).

Biomedicina: a 3DP de órgãos humanos é um dos mais recentes avanços na indústria médica do mundo hoje. Com a ajuda da atual tecnologia de bioimpressão, é possível imprimir órgãos humanos diretamente das células. No mundo de hoje, milhões de dólares foram gastos em muitos institutos de pesquisa e educação para eliminar os limites da impressão de órgãos. O objetivo dos pesquisadores é substituir um órgão humano com sucesso. No processo de impressão de órgãos, várias máquinas e materiais são pesquisados em todo o mundo. Os órgãos mais impressos com esta tecnologia são tecidos do fígado, cartilagem, pele, coração e ossos, etc. Alguns dos principais desafios dessas tecnologias dependem da impressão de órgãos vivos (vida útil dos órgãos impressos), ambientes de impressão e pós-processamento (como a autoclavagem). Os avanços nessa área mostram claramente que os pesquisadores estão muito próximos do futuro, onde a substituição do órgão humano pelo órgão impresso é atingível (DUDA & RAGHAVAN, 2016). A impressão 3D já foi comprovada que é viável em várias aplicações, incluindo a fabricação de óculos, dispositivos protéticos personalizados e implantes dentários (SCHUBERT et al., 2013). Além disso, a 3D está se tornando popular devido à capacidade de imprimir diretamente órgãos com forma projetada e porosidade controlada. Alguns destes suportes inorgânicos são biodegradáveis e provaram ser ideais para engenharia de tecido ósseo (BOSE et al., 2013). A 3DP está emergindo como uma ferramenta poderosa para engenharia de tecidos, permitindo a cultura de células 3D dentro de complexas arquiteturas biomédicas (ZHU et al., 2016).

Indústria de Alimentos: nos últimos anos, a 3DP de alimentos tem sido amplamente investigada, devido às suas vantagens, tais como: projetos de alimentos personalizados, nutrição personalizada, cadeia de suprimentos simplificada e diversificação do material alimentício disponível. No entanto, para obter uma impressão precisa, três aspectos principais devem ser considerados: primeiramente, as propriedades do material, os parâmetros do processo e os métodos de pós-processamento, com atenção especial às propriedades reológicas, mecanismos de ligação, propriedades termodinâmicas, métodos de pré-tratamento e pós-processamento. Além disso, há três desafios principais no 3D dos alimentos: 1) precisão de impressão 2) produtividade do processo e 3) produção de produtos multicores e com vários sabores (LIU et al., 2017; DANKAR et al., 2018).

Indústria da moda: A 3DP mostra uma série de vantagens em comparação com os processos de fabricação tradicionais dentre eles: um processo acelerado, menor tempo de produção e custos mais baixos relacionados a estoque, armazenamento, embalagem e transporte. Este artigo discute os cinco tipos de métodos 3D que apresentam grande potencial de aplicação, incluindo estereolitografia, sinterização seletiva a laser, modelagem de deposição fundida, PolyJet e *binder jetting* (VANDERPLOEG et al., 2017).

Componentes elétricos: a impressão 3D é uma tecnologia exclusiva que potencialmente oferece um alto grau de liberdade para a personalização de produtos práticos que incorporam componentes elétricos. A disponibilidade de material barato, confiável e eletricamente condutivo será indispensável na fabricação de tais circuitos e sensores. Até o momento, filamentos condutores imprimíveis em 3D com condutividade alta o suficientemente para fabricar circuitos práticos são ainda necessários para a modelagem de deposição fundida (KWOK et al., 2017).

Indústria de Fundição: A aplicação da tecnologia de moldes de fundição 3D permite uma considerável aceleração de trabalhos em protótipos de fundição, permitindo uma redução nos custos de impressão dos moldes de fundição. A fim de reduzir os custos de impressão, um molde de revestimento pode ser feito e depois complementado com outra moldagem com um material mais barato. A tecnologia de fabricação de moldes de fundição em processo de impressão tridimensional oferece um enorme potencial de fabricação. É por isso que uma pesquisa adicional sobre sua aplicação é aconselhável utilizar vários elementos fundidos de ligas não ferrosas (BUDZIK, 2007).

Portanto, há um consenso crescente de que as tecnologias de impressão 3D desempenham um papel importante na revolução industrial tecnológica. A história mostrou que a revolução tecnológica sem a evolução adequada do modelo de negócios é uma armadilha para muitas empresas. No caso do 3D, a questão é ainda mais complicada, pelo fato de que a adoção dessas tecnologias ocorre em quatro fases sucessivas (prototipagem rápida, ferramental rápido, manufatura digital e fabricação caseira) que correspondem a um nível diferente de envolvimento do 3D em um processo de produção (CHEN et al. 2017).

3. CONCLUSÃO

Esta breve revisão fornece uma compreensão básica do papel da tecnologia 3D na Indústria 4.0. Conforme apresentado, as fábricas inteligentes do futuro têm todos os seus processos interconectados pela Internet das Coisas, incorporando maior flexibilidade e individualização dos processos de fabricação. Não há dúvida de que as tecnologias 3DP estão levando à próxima grande revolução industrial. Devido à sua versatilidade, a Manufatura Aditiva desempenha um papel-chave na Indústria 4.0, economizando tempo e custos, sendo decisivo para a eficiência do processo e reduzindo sua complexidade, permitindo uma rápida prototipagem e processos de produção altamente descentralizados.

Referências

ALLEN, J. *An Investigation into the Comparative Costs of Additive Manufacture vs. Machine from Solid for Aero Engine Parts*. In *Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing* (17-1). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-139, Paper 17. Neuilly-sur-Seine, France: RTO, 2006. Disponível em: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp/> Acesso em 29/08/2018.

BHAVAR, V.; KATTIRE, P.; PATIL, V.; KHOT, S.; GUJAR, K.; SINGH, R. *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing*, 4th International conference and exhibition on Additive Manufacturing Technologies-AM-2014, September 1,2 , Bangalore, India, 2014.

BIRCHNELL, T. & URRY, J. *3D, SF and the future*. *Futures*, 5025–5034, 2013.

- BOSE, S.; VAHABZADEH, S.; BANDYOPADHYAY, A.** Bone tissue engineering using 3D printing. *Materials Today*, 16(12):496-504, 2013.
- BUDZIK, G.;** Possibilities of utilizing 3DP technology for foundry mould making. *Archives of Foundry Engineering*, 7(2):65-68., 2007.
- BULLINGER, H.-J.** *Einführung in das Technologiemanagement; Modelle, Methoden, Praxisbeispiele*, TeubnerVerlag; Stuttgart, 1994.
- CHEN, L.; HE, Y.; YANG, Y.; NIU, S.; REN, H.** The research status and development trend of additive manufacturing technology. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(9-12):3651-3660, 2017.
- COOPER, K.** *Rapid Prototyping Technology*, CRC Press, 248 p., 2001.
- DANKAR, I.; HADDARAH, A.; OMAR, F.E.L.; ET AL.** 3D printing technology: The new era for food customization and elaboration. *Trends in Food Science & Technology*, 75: 231-242, 2018.
- DILBEROGLU, U.M.; GHAREHPAPAGH, B.; YAMAN, U.; DOLEN, M.** The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 11:545-554, 2017.
- DING, B.** Pharma Industry 4.0: literature review and research opportunities in sustainable pharmaceutical supply chains. *Process Safety and Environmental Protection*. In press, 2018.
- DUDA, T.; & RAGHAVAN, L.V.** 3D Metal Printing Technology. *IFAC-PapersOnLine*, 49-29:103–110, 2016.
- GONZALEZ, J.; CANO, S.; SCHUSCHNIGG, S.; KUKLA, C.; SAPKOTA, J.; HOLZER, C.** Additive Manufacturing of Metallic and Ceramic Components by the Material Extrusion of Highly-Filled Polymers: A Review and Future Perspectives. *Materials*, 11(5):840, 2018.
- HAGEL, J.; BROWN, J.S.; KULASOORYA, D.; GIFFI, C.A.; CHEN, M.** *The future of manufacturing*, Deloitte University Press, 24 p., 2015, Disponível em: <http://dupress.com/articles/future-of-manufacturing-industry/> Acesso em 29/08/2018.
- HOPKINSON, N.; HAGUE, R.J.M.; DICKENS, P.M.** *Rapid manufacturing*. An industrial revolution for the digital age. Chichester, England: Ed. John Wiley, 304 p., 2006.
- HWA-HSING, T.; MING-LU, C.; AND HSIAO-CHUAN, Y.** Slurrybased selective laser sintering of polymer-coated ceramic powders to fabricate high strength alumina parts. *Journal of the European Ceramic Society*, 31(8):1383–1388, 2011.
- LEE, J-Y; AN, J.; CHUA, C.K.** Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. *Applied Materials Today*, 7:120-133, 2017.
- KAGERMANN, H.; LUKAS, W.; WAHLSTER, W.** Abschotten ist keine Alternative. In: *VDI Nachrichten*, Issue 16, 2015.
- KHOO, Z.X.; TEOH, J.E.M.; LIU, Y. CHUA, C.K.; YANG, S.; AN, J.; LEONG, K.F.; YEONG, W.Y.** 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10:3:103-122, 2015.
- KRUTH, P.P.** Material in-process manufacturing by rapid prototyping techniques. *CIRP Annals — Manufacturing Technology*, 40(2):603–614, 1991.
- KWOK, S.W.; ET AL.** Electrically conductive filament for 3D-printed circuits and sensors. *Applied Materials Today*, 9:167-175, 2017.
- LIGON, S.C.; LISKA, R.; STAMPFL, J.; GURR, M.; MÜLHAUPT, R.** Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. *Chem. Rev.*, 9; 117(15):10212–10290, 2017.
- LIM, C.W.J.; LE, K.Q.; LU, Q.; WONG, C.H.** An Overview of 3-D Printing in Manufacturing Aerospace and Automotive Industries. *Potentials IEEE*, 35(4):18-22, 2016.
- LINDEMANN, C.; JAHNKE, U.; MOI, M.; KOCH, R.** Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing, *Conference: Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference*, At: Austin, TX, USA, Volume: 23th, 177-188, 2012.

- LIU C.; HO, C.; WANG, J.** *The development of 3D food printer for printing fibrous meat materials.* IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 284(012019)1-9, 2017.
- LUQUE A.; PERALTA, M.E.; DE LAS HERAS, A.; CÓRDOBA, A.** *State of the Industry 4.0 in the Andalusian food sector.* Procedia Manufacturing, 13: 1199-1205, 2017.
- MAVRI, M.** *Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology.* Knowledge and Process Management, 22(3):141-147, 2015
- MORVAN, S.; HOCHSMANN, R.; SAKAMOTO, M.** *ProMetal RCT(TM) process for fabrication of complex sand molds and sand cores.* Rapid Prototyping, 11(2):1-7, 2005.
- MURR, L.; GAYTAN, S.; RAMIREZ, D.; ET AL.** *Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam melting technologies.* Journal of Materials Science & Technology, 28(1):1-14, 2012.
- NGO, T.D.; KASHANI, A.; IMBALZANO, G.; NGUYEN, K.T.Q.; HUI, D.** *Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges.* Composites Part B: Engineering, 143(1):172-196, 2018.
- NOORANI, R.I.** *Rapid Prototyping — Principles and Applications,* JohnWiley & Sons, 400 p., 2006.
- PETROVIC, V.; VICENTE, J.; GONZALEZ, H.; ET AL.** *Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies.* International Journal of Production Research, 49(4):1061-1079, 2011.
- PHAM, D.T. & JI, C.** *Design for stereolithography.* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 214(5):635-640, 2000.
- RAYNA, T. & STRIUKOVA, L.** *From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation.* Technological Forecasting and Social Change, 102:214-224, 2016.
- HONG, S.Y.; KIM, Y.C.; WANG, M.; KIM, H-I.; ET AL.** *Experimental investigation of mechanical properties of UV-Curable 3D printing materials.* Polymer, 145:88-94, 2018.
- SALMORIA, G.V.; PAGGI, R.A.; LAGO, A.; AND BEAL, V.E.** *Microstructural and mechanical characterization of PA12/MWCNTs nanocomposite manufactured by selective laser sintering.* Polymer Testing, 30(6):611-615, 2011.
- SANTOS, K.; LOURES, E.; PIECHNICKI, F.** *O Canciglieri, Opportunities Assessment of Product Development Process in Industry 4.0.* Procedia Manufacturing, 11:1358-1365, 2017.
- SCHUBERT C.; VAN LANGEVELD M.C.; DONOSO, L.A.** *Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs.* British Journal of Ophthalmology, 98(2):159-161, 2013.
- SEMETAY C.** *Laser engineered net shaping (LENS) modeling using welding simulation concepts [ProQuest Dissertations and Theses],* Lehigh University, 2007.
- SINGH, R.** *Process capability study of polyjet printing for plastic components.* Journal of Mechanical Science and Technology, 25(4):1011-1015, 2011.
- SPATH, D.; GANSCHAR, O.; GERLACH, S.; HÄMMERLE, M.; KRAUSE, T.; SCHLUND, S.** *Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0.* Fraunhofer IAO, Fraunhofer Verlag, 2013.
- SPECHT, G.; BECKMANN, C.; AMELINGMEYER, J.** *F&E-Management Kompetenzim Innovationsmanagement;* VerlagSchäffer-Poeschel; Stuttgart, 2002.
- STOCK, T. & SELIGER, G.** *Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0.* Procedia CIRP, 40:536-541, 2016.
- THOMAS D. S. & GILBERT S.W.** *Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing – A Literature Review and Discussion,* NIST Special Publication 1176, 89p. , 2014.
- THOMPSON, A.; MORONI, G.; VANEKER, T.; FADEL, G.; CAMPBELL, R.I.; GIBSON, I.; BERNARD, A.; GRAF, P.; AHUJA, B.; MARTINA, F.** *Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations and Constraints.* CIRP Annals – Manufacturing Technology, 65(2):737-760, 2016.

- TRENFIELD, S.J.; AWARD, A.; GOYANES, A.; GAISFORD, S.; BASIT, A.W.** *3D Printing Pharmaceuticals: Drug Development to Frontline Care*. Trends in Pharmacological Sciences. 39(5):440-451, 2018.
- VAIDYA, S.; AMBAD, P.; AMBAD, S. BOCHLE.** *Industry 4.0 – A Glimpse*. Procedia Manufacturing, 20:233–238, 2018.
- VANDERPLOEG, A.; LEE, S-E.; MAMP, M.;** *The application of 3D printing technology in the fashion industry*, International Journal of Fashion Design, Technology and Education, 10:2, 170-179, 2017.
- WANG, L. & WANG, G.** *Big Data in Cyber-Physical Systems, Digital Manufacturing and Industry 4.0*. International Journal of Engineering and Manufacturing, 4:1-8, 2016.
- WONG, K.V.; & HERNANDEZ, A.** *A Review of Additive Manufacturing*. ISRN Mechanical Engineering, Article ID 208760:1-10, 2012.
- ZHOU, J.** *Digitalization and intelligentization of manufacturing industry*. Advances in Manufacturing, 1(1):1-7, 2013.
- ZHU, W.; MA, X.; GOU, M.; MEI, D.; ZHANG, K.; CHEN, S.** *3D printing of functional biomaterials for tissue engineering*. Curr. Opin. Biotechnol., 2016 Aug;40:103-112, 2016.
- MAVRI, M.** *Redesigning a Production Chain Based on 3D Printing Technology*. Knowledge And Process Management, [s.l.], v. 22, n. 3, p.141-147, 12 jun. 2015.