

DIAGNÓSTICO SOBRE O PAPEL DA IMPRESSÃO 3-D NA QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Marlon Wesley Machado Cunico

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tecnologias de manufatura aditiva, também conhecidas como impressoras 3D, conquistaram papel fundamental e disruptivo no cotidiano das indústrias e até mesmo na vida pessoal de muitos. (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010; CUNICO, 2012; CUNICO, 2015; VOLPATO, 2017).

Pode-se identificar que a mudança do perfil da produção e de segmentos de mercado também vem sofrendo grandes mudanças, visto que a demanda e a customização de produtos foi alterada. (RICHARDSON; HAYLOCK, 2012; SAURAMO, 2014).

Neste capítulo, busca-se apresentar as principais tecnologias de manufatura aditiva e suas contribuições para Indústria 4.0. Adicionalmente, são apresentadas abordagens de manufatura híbridas que permitem a implementação desta indústria.

Este capítulo é dividido em quatro partes: levantamento do estado da arte; produção híbrida e distribuída por meio de impressoras 3D; impressoras 3D e a indústria 4.0 e conclusões.

Na primeira parte deste trabalho são apresentados os principais marcos históricos relacionado às impressoras 3D, além das principais tecnologias desenvolvidas ao longo do advento da indústria 4.0.

São apresentados movimentos aceleradores das tecnologias, como comunidades *open-source*, entre outros desenvolvimentos paralelos que fortaleceram a popularização de impressoras 3D no cotidiano de desenvolvedores, hobbistas e indústrias.

Outro ponto que também é apresentado no levantamento do estado da arte é o nascimento da Indústria 4.0, conceitos a ela relacionados, diferenças em relação a outras revoluções industriais e peculiaridades que as impressoras 3D permitem nessa nova abordagem de produção.

A segunda parte deste trabalho busca apresentar formas de fabricação híbridas, nas quais tecnologias de manufatura aditiva são incorporadas como parte do meio produtivo, e assim vantagens produtivas podem ser obtidas em baixa e em larga escala. Pode-se identificar que a produção híbrida e distribuída permite vantagens competitivas e que impressoras 3D permitem a fabricação desde protótipos até produtos em larga escala de forma direta e indireta.

A terceira parte deste capítulo busca contextualizar a participação de impressoras 3D na indústria 4.0, indicando exemplos de células autônomas, BigData, *machine learning*, B2B, B2C e novos mercados.

Por outro lado, esta seção também indica riscos legais que nasceram junto aos benefícios advindos da Indústria 4.0 e das impressoras 3D.

Por fim, são apresentadas as considerações finais e projeção sobre futuro das impressoras 3D e indústria 4.0, sendo indicado um *roadmap* de convergência tecnológica.

ESTADO DA ARTE

Fundamentação histórica sobre impressoras 3D

Apesar de parecer muito recente, o conceito de impressoras 3D tem sido desenvolvido há longa data. A primeira vez que conceitos de manufatura aditiva foram consolidados e publicados data de 1890, quando Blather indicou a construção de moldes por meio de chapas cortadas e empilhadas topograficamente.

Apesar desse indicativo, podemos salientar a patente de quatro tecnologias como as principais pioneiras na revolução das impressoras 3D: estereolitografia, fabricação por filamento fundido, sinterização seletiva a *laser* e impressão de aglomerante em particulado (*bind jetting*).

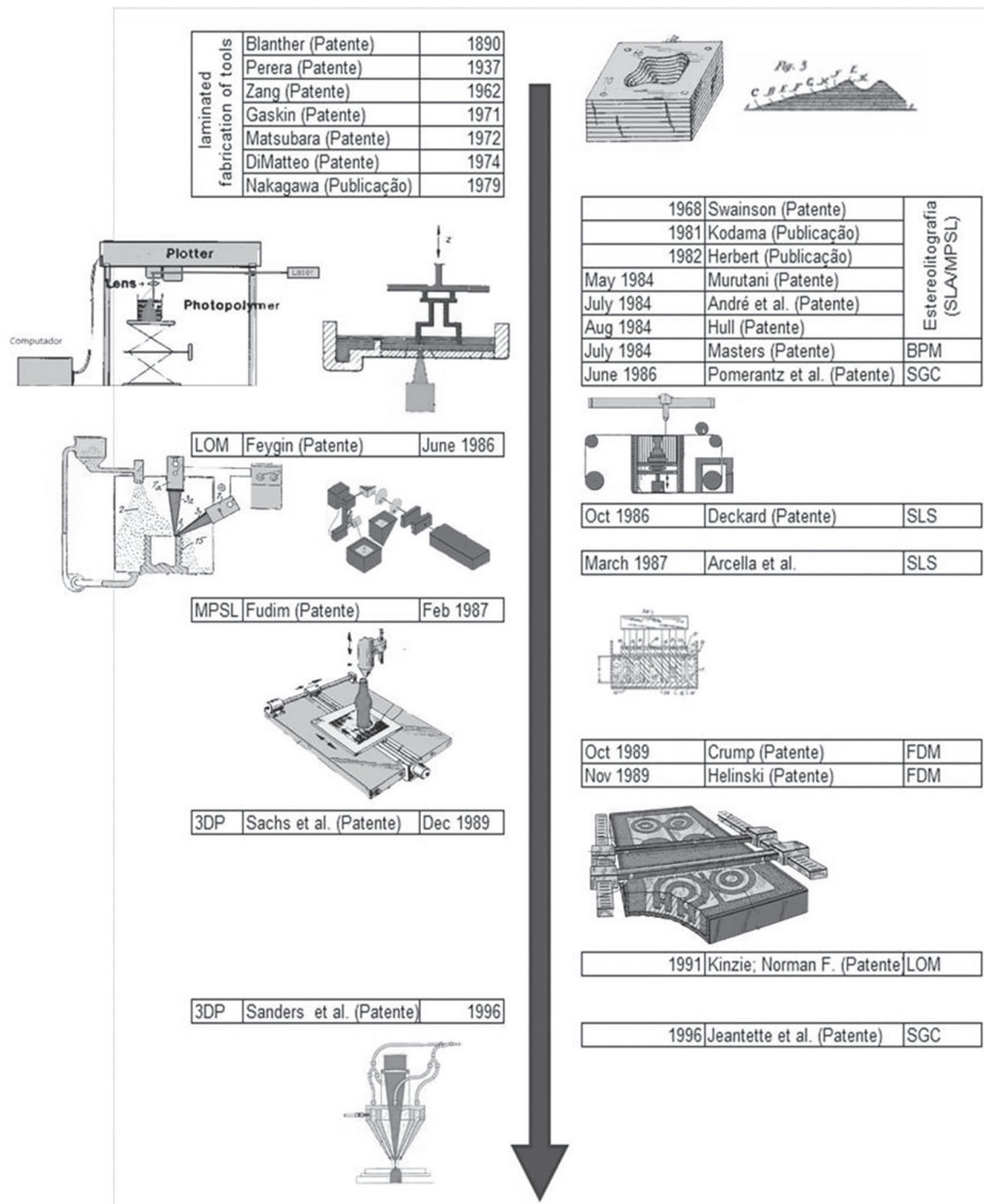
Essas tecnologias podem se destacar por terem revolucionado a forma de se fabricar de forma automatizada, além de terem implicado na criação das duas maiores companhias globais de impressoras 3D, que atualmente têm mais de 2 bilhões de dólares.

Embora haja diversas tecnologias de manufatura aditiva, todas seguem o mesmo princípio: fabricação por empilhamento de camadas. Nesse quesito, diversos autores indicam uma forma de classificar tais tecnologias de acordo com o tipo de matéria-prima a ser processada. Nesse caso, pode-se classificar as impressoras 3D em:

- tecnologias a base de fusão e deposição (extrusão);
- tecnologias a base de polímeros líquidos;
- tecnologias a base de sólidos laminados;
- tecnologias a base de pó.

Nessa classificação, destacam-se as mesmas tecnologias citadas anteriormente, cujos marcos temporais são 1984 (*Stereolithography – SLA*), 1986 (*Selective Laser Sintering – SLS*), 1989 (*Fused Deposition Modeling – FDM* ou *Fabricação com Filamento Fundido – FFF*), 1989 (*3D Printing – 3DP*).

Figura 1 – Roadmap de principais patentes relacionadas a impressoras 3D e à manufatura aditiva



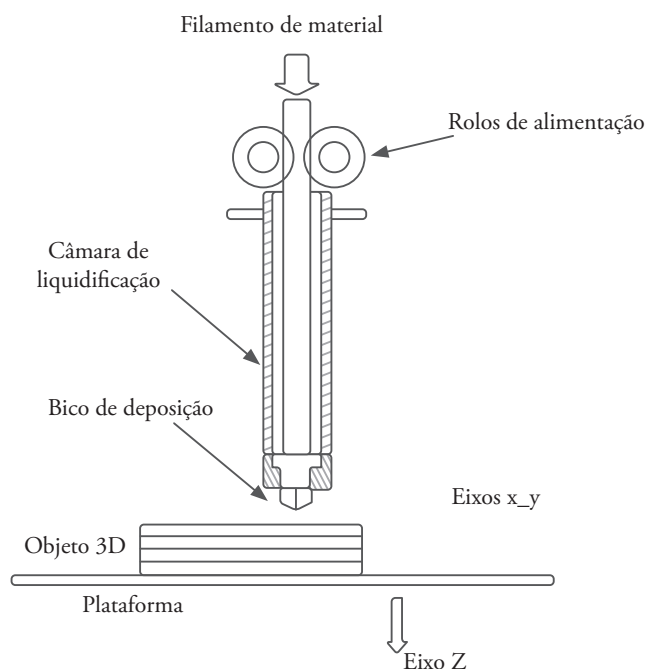
Impressoras 3D por materiais sólidos

Impressoras 3D baseadas em filamentos fundidos

Na Figura 2, pode-se observar uma representação esquemática do processo Fused Deposition Modelling (FDM), na qual um filamento de material termoplástico é movimentado para dentro da câmara de liquidação por ação de rolos de alimentação (normalmente acionados por motores de passo). Ao redor dessa câmara são posicionadas resistências térmicas com a finalidade de elevar a temperatura do material até valores superiores à temperatura de amolecimento do plástico (ponto de transição vítrea).

A fim de construir o perfil da camada, esse cabeçote se desloca ao longo dos eixos 'x' e 'y' adicionando filamentos de material. Após a finalização de cada camada, a plataforma de deposição se desloca no sentido 'z' com a finalidade de construção da próxima camada, repetindo esse procedimento até a finalização da peça. (PRINZ; ATWOOD *et al.*, 1997; COOPER, 2001; GIBSON, 2005; LIOU, 2007; VOLPATO, 2007; CUNICO, 2015; VOLPATO, 2017).

Figura 2 – Esquemático de tecnologia de manufatura aditiva por fusão de filamento sólido.



Fonte – Cunico, 2015.

Entre as principais tecnologias comerciais que utilizam esse princípio de funcionamento está a modelagem por fusão e deposição (Fused Deposition Modelling – FDM). Essa tecnologia, que é uma das mais difundidas no mercado, foi desenvolvida pela empresa Stratasys, tendo como marco inicial o depósito de patente da tecnologia pelo fundador da Stratasys. (CRUMP, 1989). Essa tecnologia é uma das pioneiras na área de fabricação aditiva (PRINZ; ATWOOD *et al.*, 1997; COOPER, 2001;

GIBSON, 2005; LIOU, 2007; VOLPATO, 2007), sendo o conceito de base para as impressoras 3D de baixo custo encontradas atualmente.

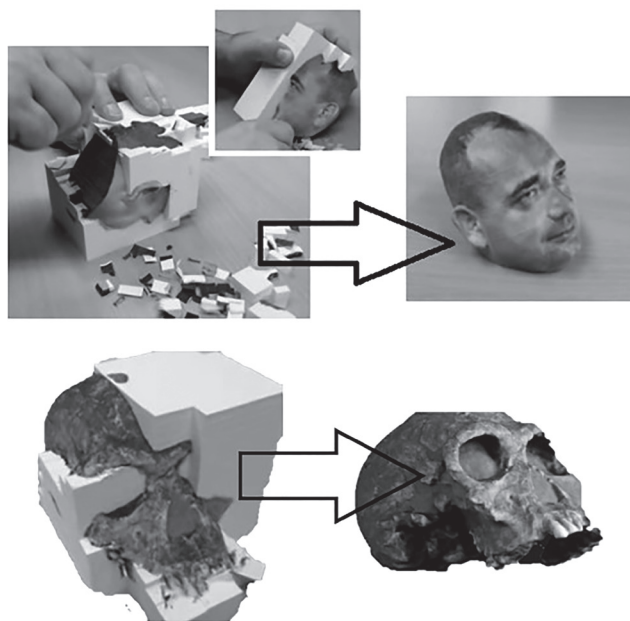
Impressoras 3D baseadas em material laminado

Outra classificação de impressoras 3D tem como base a utilização de sólidos laminados. Essa tecnologia, denominada AM, foi uma das primeiras a serem comercializadas, em 1991. Inicialmente, a empresa japonesa que desenvolveu essa tecnologia (Kira) denominou seu processo de *Laminated Object Modelling* (LOM). (PRINZ; ATWOOD *et al.*, 1997; GIBSON, 2005; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

O princípio de funcionamento dessa impressora 3D baseia-se no corte e na colagem de folhas de papel ou plástico, e o perfil de camada é gerado por meio de um *laser* de CO₂ que se desloca ao longo dos eixos 'xy'. As camadas são empilhadas gradativamente e coladas por meio de resinas térmicas.

Como pode ser observado na Figura 3, após a finalização de cada camada uma plataforma é movimentada no eixo 'z', possibilitando a construção de novas camadas e a aderência da camada com folhas anteriores. Para colar as camadas, um rolo comprime a camada a ser fabricada contra as camadas anteriores, proporcionando a aderência por meio de pressão e calor. (PRINZ; ATWOOD *et al.*, 1997; COOPER, 2001; GIBSON, 2005; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010; CUNICO, 2015).

Figura 3 – Exemplo de resultado de impressora 3D de laminado (mcor).



Fonte – Cunico, 2015.

Esse tipo de tecnologia é muito eficiente para a fabricação de protótipos estéticos e de baixíssimo custo, sendo um dos processos com material mais barato no mercado.

Impressoras a base de material líquido

Impressoras 3D baseadas em resinas fotocuráveis

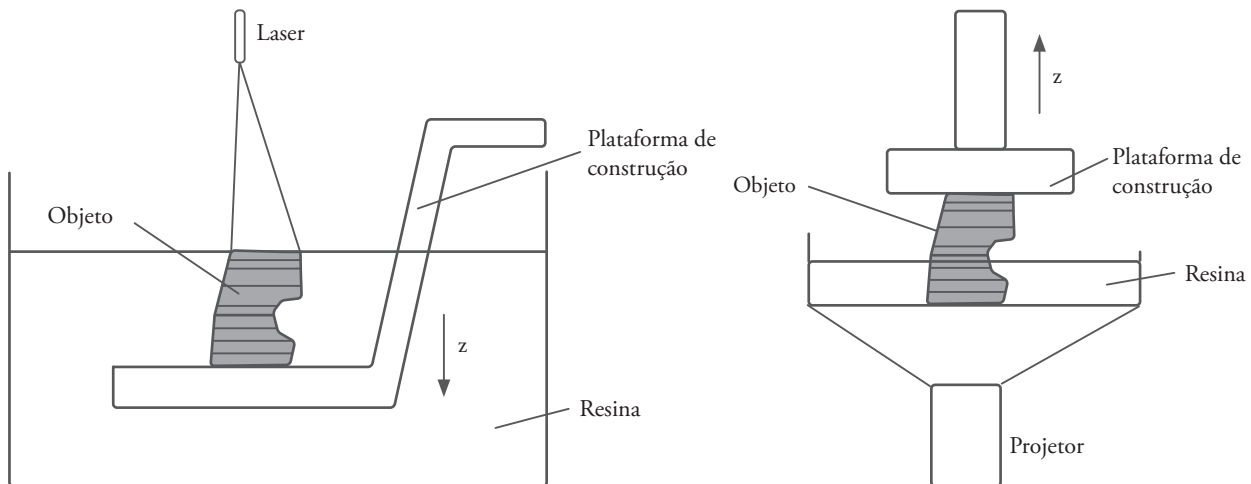
Outra classificação de impressoras 3D se baseia em materiais líquidos. A estereolitografia (SLA) é uma das mais difundidas tecnologias de impressoras 3D, e foi comercializada inicialmente pela empresa 3D Systems.

Apesar da validação de seu princípio funcional ter sido publicada por Kodama (1981) e Herbert (1982), a tecnologia SLA teve como marco inicial a patente do fundador da 3D Systems em 1984. (HULL, 1986; PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; GIBSON, 2005; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

O princípio funcional desse processo consiste na cura localizada de resina fotossensível por meio de feixe de *laser* UV que se desloca ao longo dos eixos 'x' e 'y'. Tal feixe incide sobre um recipiente imerso em resina a fim de construir a silhueta da camada previamente calculada computacionalmente.

Após a finalização de cada camada, uma plataforma de sustentação do material imersa no reservatório de resina se desloca ao longo do eixo 'z', permitindo o início da construção de uma nova camada, como pode ser observado na ilustração da Figura 4.

Figura 4 – Esquemático de tecnologia de manufatura aditiva por estereolitografia a *laser* (SL – Stereolithography) e por máscara de projeção (MPSL).



Fonte – Cunico, 2015.

Impressoras 3D baseadas em cabeçote jato de tinta

Com referência às tecnologias de prototipagem rápida baseadas em impressão jato de tinta de fotopolimerizáveis (Inkjet Print – IJP), o princípio de funcionamento consiste na criação de camadas por deposição de gotas de material por meio de cabeçote jato de tinta.

Essa tecnologia foi desenvolvida inicialmente pela empresa Sanders Prototyping (SolidScape) em 1994. Contudo, a utilização de jato de tinta em equipamentos AM passou a ser mais expressiva somente a partir de 1999, quando foi patenteada a concepção empregada pela empresa israelense Objet Geometries (PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; SANDERS; FORSYTH *et al.*, 1998; GOTHAIT, 2000; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010). Em 2013, esta empresa se fundiu com a Stratasys, principal fabricante de processos FDM.

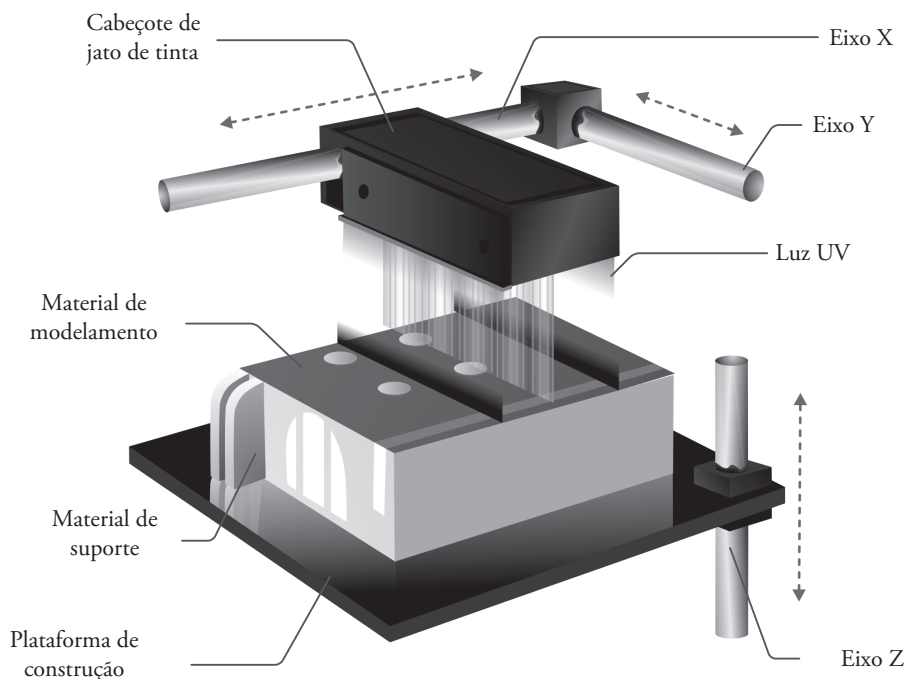
No conceito inicial, apresentado pela Sanders Prototyping, é utilizado cabeçote jato de tinta térmico a fim de depositar seletivamente gotas de materiais a base de cera para a construção de seção transversal de objetos 3D ao longo dos eixos 'x' e 'y'.

Após a finalização de cada camada, a plataforma de construção se desloca em 'z' proporcionando a construção da próxima camada, sendo que esse processo se repete até a conclusão da peça. (PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; SANDERS; FORSYTH *et al.*, 1998; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Já na concepção adotada inicialmente pela Objet um cabeçote jato de tinta piezoelétrico é utilizado para a deposição de gotas de material fotocurável no estado líquido sobre plataforma ou substrato ao longo dos eixos 'xy'.

Simultaneamente, essas gotas são solidificadas devido à exposição a uma fonte de luz UV extensa. Após a finalização de cada camada, a plataforma de construção se desloca em 'z', dando início a uma nova camada, como pode ser observado na Figura 5. (PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; GOTHAIT, 2000; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Figura 5 – Esquemático de impressora 3D jato de tinta fotocurável.



Fonte – Cunico, 2015.

Impressoras a base de material em pó

Impressoras 3D baseadas em jateamento de aglomerante

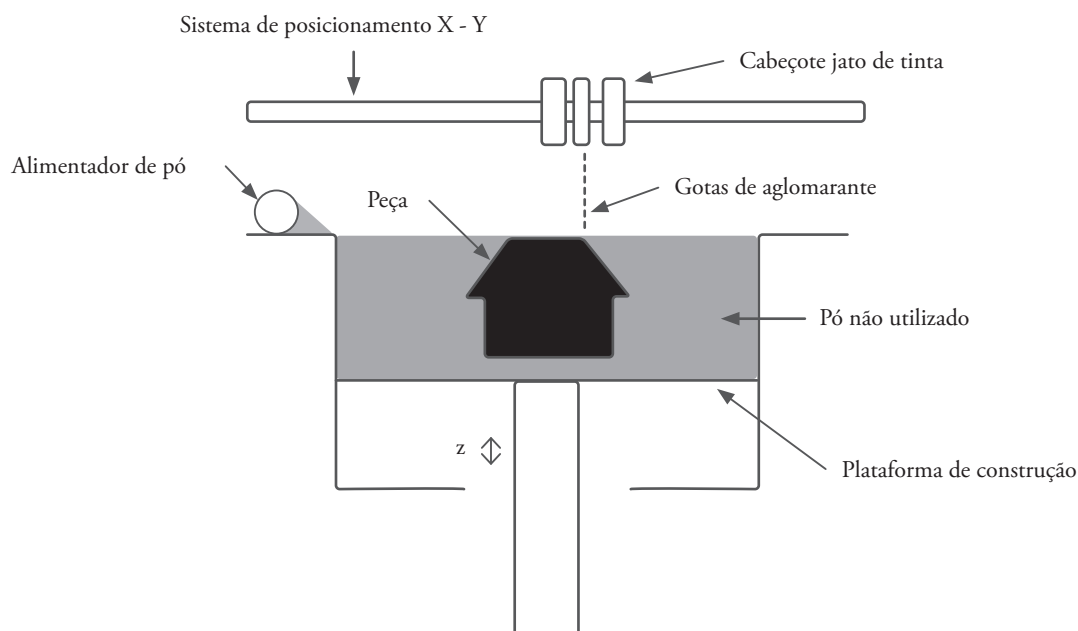
Dentre as diversas categorias de impressoras 3D, a mais difundida e que projetou o nome da tecnologia é a impressão 3D baseada em materiais particulados. Esse processo foi inicialmente desenvolvido pela Universidade Tecnológica de Massachussets (MIT) e patenteada em 1989 por Emanuel Sachs e seus colegas pesquisadores.

Contudo, o produto comercial foi lançado no mercado apenas nos anos 1990 pela empresa Z Corporation, que faz parte da empresa 3D Systems. (SACHS; HAGGERTY *et al.*, 1989; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

O princípio funcional se fundamenta na deposição de um material colante (*binder*) sobre uma camada de pó cerâmico (geralmente gesso), gerando um aglomerado. Nesse processo, apresentado na Figura 6, um reservatório contendo pó eleva uma plataforma enquanto um rolo distribui esse mesmo pó sobre a plataforma de construção da peça.

Para a geração de camada, um cabeçote jato de tinta se desloca em 'xy' de forma a depositar ou borrfirar o material colante sobre a camada de pó. Esse processo se repete até a finalização da peça, quando, normalmente, é utilizado um jato de ar para retirar o pó excedente do objeto. (SACHS; HAGGERTY *et al.*, 1989; COOPER, 2001; GIBSON, 2005; LIOU, 2007; VOLPATO, 2007; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Figura 6 – Esquemático de impressora 3D jato de tinta de aglomerante de pó (*bindjet*).



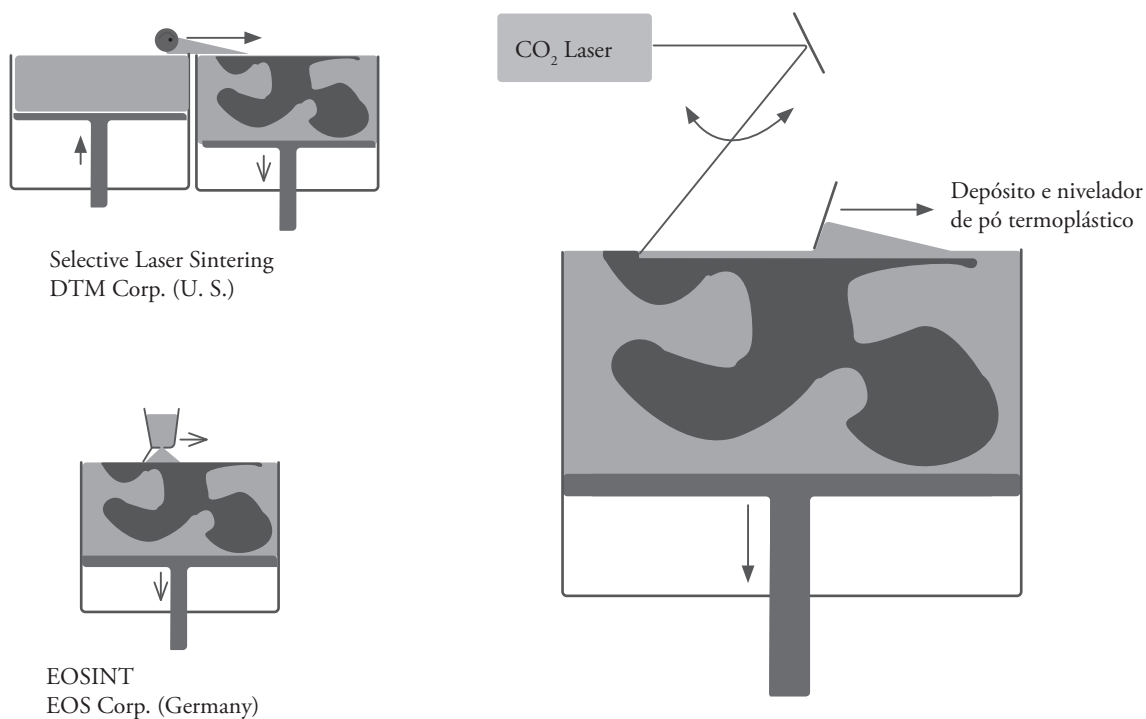
Impressoras 3D baseadas em sinterização seletiva a *laser* e fundição seletiva a *laser*

Os processos de impressão 3D baseados em sinterização seletiva a *laser* (SLS) começaram a ser desenvolvidos na Universidade do Texas em Austin, Estados Unidos, e foram patenteados em 1989. Contudo, sua comercialização se iniciou apenas em 1990 pela empresa DTM. (BEAMAN; DECKARD, 1990; PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; GIBSON, 2005; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Essa tecnologia consiste na construção de objetos 3D por meio da sinterização de pó de material. A construção das camadas ocorre por meio de fusão ou sinterização do particulado metálico, cerâmico ou polimérico com *laser*, que se desloca ao longo dos eixos 'xy'. Após o término de cada camada, a plataforma de construção se desloca no eixo 'z', permitindo a alimentação de material na nova camada, como pode ser observado na Figura 7. (PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; COOPER, 2001; GIBSON, 2005; LIOU, 2007; VOLPATO, 2007; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Essas etapas se repetem até o término do objeto, que em diversos casos necessita de um processo de pós-processamento para obtenção de resistência mecânica. Quando isso acontece, a peça, que também é chamada de peça verde (*Green Part*), é infiltrada por meio de material ligante em adição à queima de material residual. (PRINZ; ATWOOD *et al.* 1997; COOPER, 2001; GIBSON, 2005; LIOU, 2007; VOLPATO, 2007; GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2010).

Figura 7 – SLA.



Fonte – Cunico, 2015.

Técnicas de acabamento

Em paralelo ao desenvolvimento de novas tecnologias de manufatura aditiva e impressoras 3D, houve o desenvolvimento de técnicas de acabamento, tratamentos superficiais e pós-processamentos para que objetos fabricados por impressoras 3D tivessem alta *performance*. São exemplo o aumento de resistência mecânica, o aumento de resistência química, a redução de rugosidade e porosidade de objetos, o aumento de isotropia e homogeneidade de material, o aumento de estanqueidade, entre outros.

Pode-se indicar que essas técnicas são imprescindíveis para a incorporação de impressoras 3D no mundo industrial, visto que objetos fabricados por impressoras 3D domésticas sem pós-tratamento não resultam em resistência dimensional nem acabamento com repetibilidade adequada para comercialização.

Um exemplo de técnicas de acabamento pode ser observado na Figura 8. Ela apresenta uma das técnicas de acabamento desenvolvidas pela empresa Concep3D. Nesse exemplo foi utilizada uma estação de acabamento e tratamento superficial automatizado, na qual um conjunto de peças é colocado e finalizado em bateladas, sem a necessidade de lixamento manual ou pintura.

Figura 8 – Exemplo de técnicas de acabamento progressivas de objetos de impressão 3D sobre impressão 3D de baixíssima qualidade.



As principais técnicas de acabamento para objetos de impressão 3D podem ser classificadas em:

- técnicas de remoção;
- técnicas de recobrimento;
- tratamentos térmicos e químicos;
- técnicas de conformação e deformação.

A inclusão dessas técnicas ao processo de fabricação por manufatura aditiva é imprescindível para que os objetos apresentem características conforme necessidade de clientes.

Quebra de paradigma de projeto de produto

Pode-se também indicar que o movimento tecnológico ao redor do desenvolvimento das impressoras 3D implicou também na mudança de mentalidade sobre o conceito de produtos e de desenvolvimento de projetos de produto.

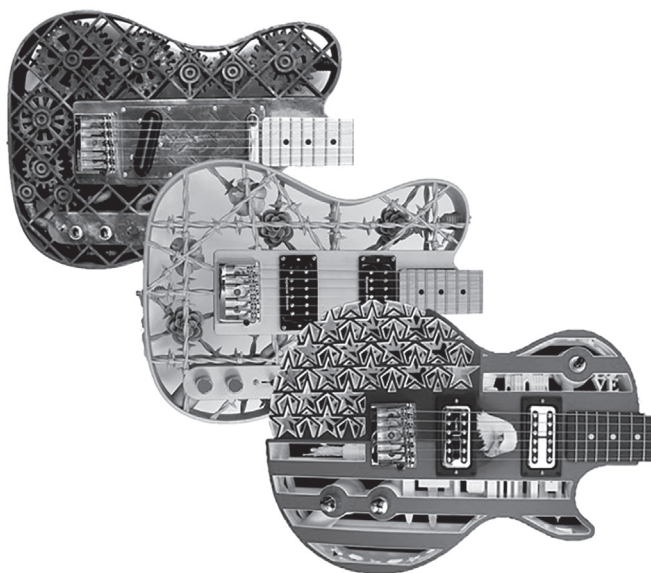
A partir do momento que o custo dos protótipos de objetos estéticos foi reduzido drasticamente, o processo de desenvolvimento de produto (que é fundamentalmente do tipo *waterfall*) pôde ser revisto, e metodologias ágeis, como *extreme programming* (XP), *scrum*, *scrum-kanban* (amplamente utilizadas em desenvolvimento de *software*), começam a fazer parte do cotidiano de *designers*, projetistas e engenheiros de desenvolvimento de produto.

Outro ponto também importante no advento das impressoras 3D é a facilidade de fabricar formas livres. A esse respeito, diversos autores indicam equivocadamente que impressoras 3D permitem fabricar qualquer forma. Infelizmente, esta afirmação não é verdadeira. Essas impressoras permitem a fabricação de formas muito mais livres que as produzidas por processos convencionais. Contudo, cada uma das tecnologias de impressão 3D apresenta restrições e características próprias para que a fabricação possa ser mais complexa e confiável.

Exemplos de fabricação de produtos com formas livres pode ser observado na Figura 9, que representa instrumentos musicais impressos pelo professor Olaf Diegel, da Universidade de Lund.

Apesar de o resultado ser extraordinário, o processo para obtenção é muito penoso, pois demanda remoção de materiais metálicos de suporte, processo de acabamento, remoção de degraus e porosidades por meio de primer, pinturas e polimentos. Em muitos casos, inclusive há a quebra do objeto, devido à variação geométrica proporcionada pela liberdade de formas.

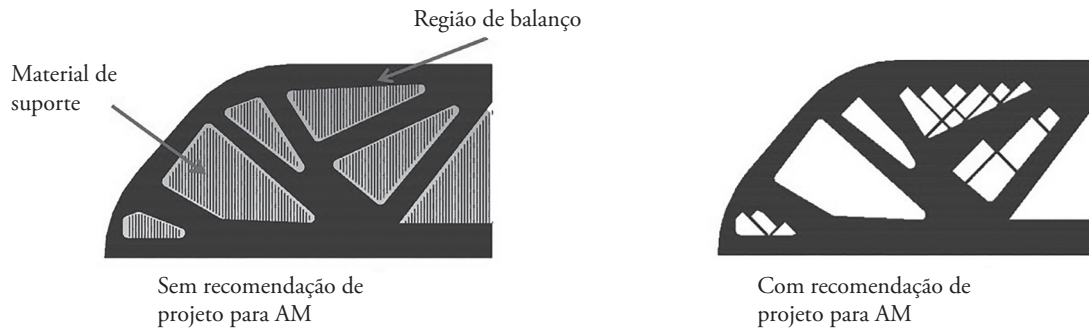
Figura 9 – Exemplo de guitarra fabricada com mecanismos livres impressos 100% em equipamento SLS.



Fonte – O autor.

Por esse motivo, diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo buscam por recomendações de projeto para manufatura aditiva (*Design for Additive Manufacturing*). Um exemplo de recomendação é apresentado na Figura 10, na qual a alteração de projeto implica na redução de tempo de fabricação, além da eliminação da necessidade de utilização de material de suporte.

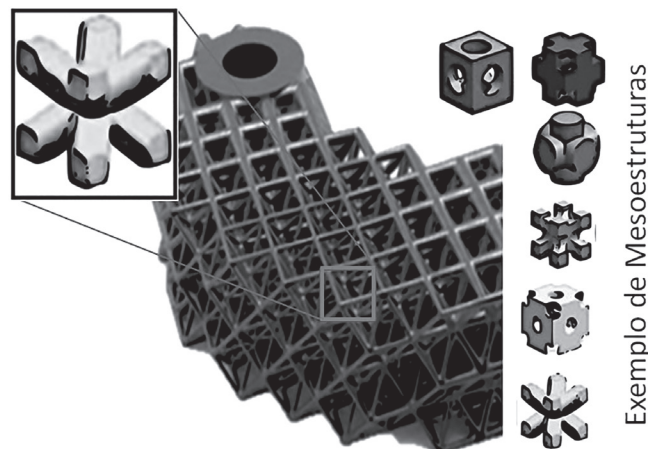
Figura 10 – Exemplo de recomendação de projeto para minimização de material de suporte.



Fonte – O autor.

Outros aspectos interessantes no que se refere à manufatura aditiva são os projetos baseados em mesoestruturas (*lattices* ou *scaffolds*). Esses projetos também tomaram grande proporção devido às impressoras 3D. (LEARY et al., 2014; THOMPSON; MORONI *et al.*, 2016; NTOPOLOGY, 2018). Nessas abordagens, objetos são fabricados com massa muito reduzida, como se pode observar na Figura 11.

Figura 11 – Exemplo de mesoestruturas e de objetos fabricados com esse conceito.



Fonte – O autor.

Pode-se também observar que nessa linha de projeto a otimização de topologia também vem ganhando espaço, e que a geometria é simplesmente um resultado de cálculos numéricos para aumento de resistência e redução de massa, concomitantemente.

Com isso, métodos clássicos de projeto de engenharia são colocados à prova, tendo eles de ser reinventados e ajustados às novas tendências de fabricação, projeto, *design* e mercado.

DESENVOLVIMENTO COMPARTILHADO E *OPENSOURCE*: ACELERADORES PARA INDÚSTRIA 4.0

A popularização das impressoras 3D não foi algo fácil ou rápido. Mas se elas já estavam bem estabelecidas no mercado desde a década de 1990, por que sua popularização demorou tanto para ocorrer?

O início da popularização das impressoras 3D teve como grandes marcos:

- a expiração da patente de Hull em 2005 e de Crump em 2009;
- o nascimento do grupo Reprap, em 2005, na Universidade de Bath, com o intuito de criar impressoras 3D autorreplicadoras;
- o nascimento do grupo FAB@HOME na Universidade de Cornell, em 2005, com a proposta de criar impressoras 3D com código aberto.

Em 2006, o desenvolvimento de *softwares* livres de planejamento (*slicers*) na universidade de Bath (Inglaterra) resultou na criação dos *softwares* Skeinforge e RepRap Host, que atualmente fazem parte de 90% do código de fatiamento de *slicers* no mercado.

Outro marco para a popularização das impressoras 3D foi a distribuição de projeto aberto e a comercialização a baixo custo de impressora MAKERBOT. A comercialização por si só não implicou grande destaque. Contudo, a iniciativa dos empresários Bre Pettis, Adam Mayer e Zach Smith em criar uma plataforma de compartilhamento de projetos *on-line* implicou na disruptura de conceitos clássicos de projeto, dando origem ao conceito de projeto colaborativo. Com isso, em apenas quatro anos a companhia Makerbot foi adquirida em 2013 pela Stratasys por 604 milhões de dólares, deixando um legado para a popularização das impressoras 3D.

Pode-se também indicar o advento, em 2001, do conceito de Fab Lab (laboratórios de fabricação) no Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT). Com isso, intensificou-se a cultura DIY (faça você mesmo) para coisas tecnológicas, permitindo a liberdade criativa e de projeto. Por meio dessa iniciativa, entre outras, pode-se observar um desenvolvimento acelerado de tecnologias de impressão 3D, escaneamento 3D, computação em nuvem e robôs autônomos, que são tecnologias de suporte fundamentais para a implementação da Indústria 4.0.

Atualmente, a iniciativa Fab Lab tem como equipamentos mais populares impressoras 3D, braços robóticos, corte a *laser*, CNC de três eixos, fresadora de circuito impresso ou estação de corrosão de circuito impresso. Nessa mesma linha, Pearce (2013), compilou um apanhado de projetos livres e técnicas de fabricação para a criação de laboratórios de bioengenharia, ciência dos materiais e engenharia por meio de desenvolvimento compartilhado.

Por conta disso, diversas outras tecnologias têm ganhado destaque, permitindo a viabilização da Indústria 4.0 na forma e no entendimento que se tem hoje. Por exemplo, técnicas de mapeamento tridimensional por meio de imagem passaram por grande evolução, implicando na redução de custos para implementação em linhas produtivas.

QUARTA REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

Pode-se observar que o avanço da tecnologia sempre direcionou o desenvolvimento da indústria, variando desde máquinas a vapor até sistemas com inteligência artificial.

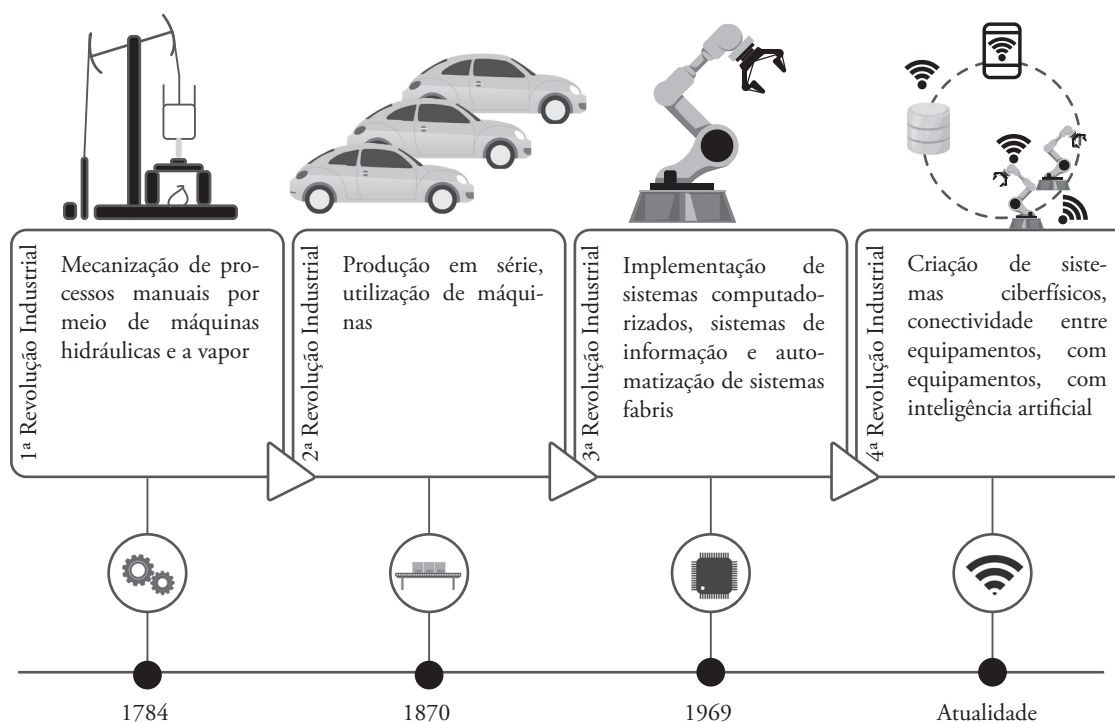
A Primeira Revolução Industrial foi marcada pela mecanização do tear, criando o conceito de produção mecanizado por meio de máquinas movidas a água ou a vapor de água.

Na Segunda Revolução Industrial, por sua vez, destacou-se o desenvolvimento de linhas de produção em série, com a distribuição de recursos e a utilização de energia elétrica.

Na Terceira Revolução Industrial, a introdução a sistemas de tecnologia da informação e de tecnologias eletrônicas implicou a automatização de processos e sistemas.

Finalmente, na Quarta Revolução Industrial busca-se a otimização dos meios produtivos por meio de sistemas ciberfísicos.

Figura 12 – Esquemático de evolução das revoluções industriais.

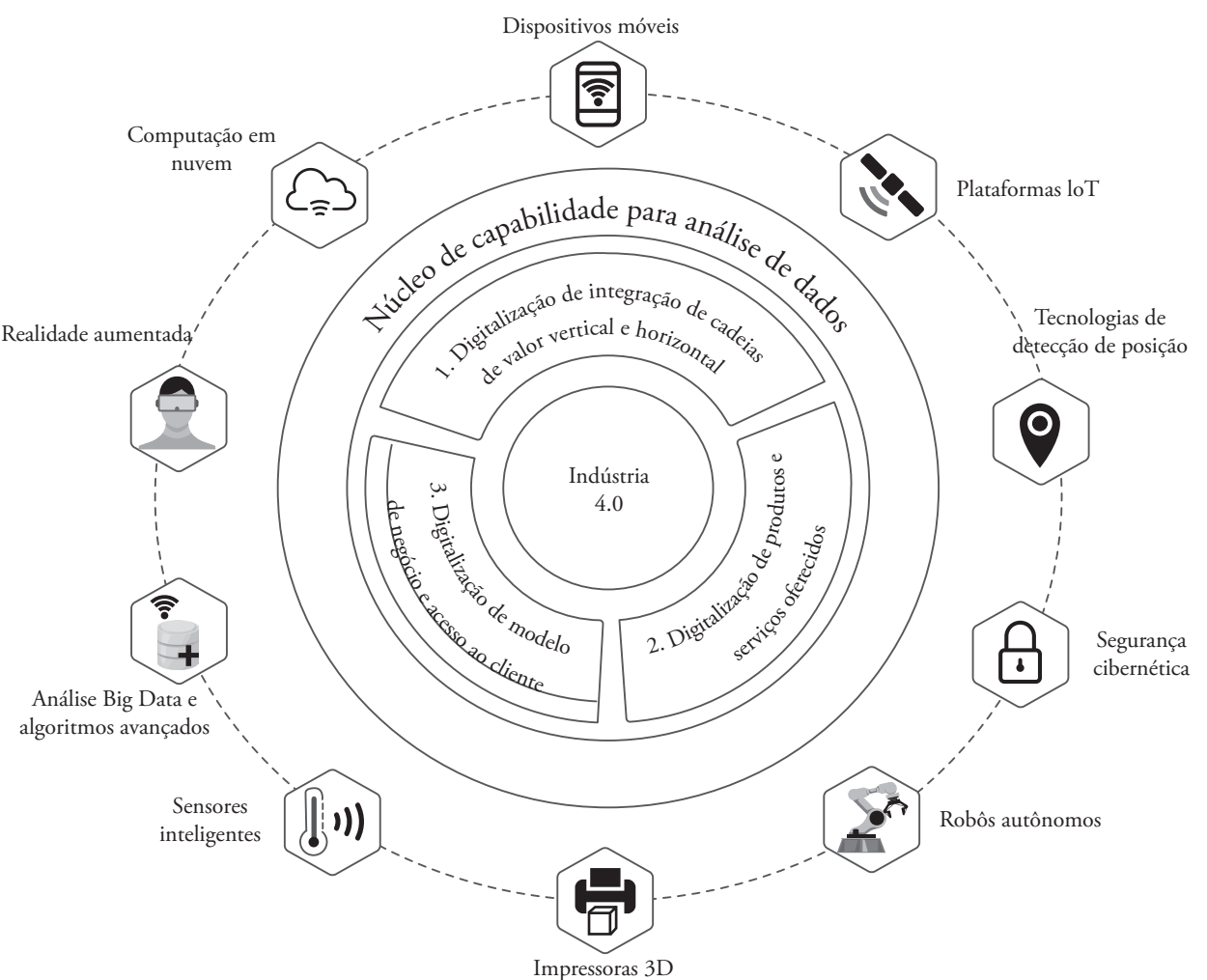


Fonte – O autor.

Com o objetivo de criar ambientes físico-cibernéticos em meio industrial foram identificadas as seguintes esferas de modificação cultural e de infraestrutura corporativa: 1) Digitalização e integração a cadeias de valor verticais e horizontais; 2) Digitalização de produtos e serviços oferecidos; e 3) Digitalização de modelo de negócio e acesso ao cliente, como pode ser observado na Figura 20.

Para dar suporte a essas mudanças, diversas tecnologias têm sido utilizadas de forma a acelerar e desenvolver sistematicamente a alteração corporativa, por exemplo: 1) dispositivos móveis; 2) plataformas de internet das coisas (IoT); 3) computação em nuvens; 4) realidade aumentada; 5) tecnologias de detecção de posicionamento; 6) análise de Big Data e algoritmos avançados; 7) segurança cibernética; 8) sensores inteligentes; 9) robôs autônomos; 10) impressoras 3D.

Figura 13 – Esquemático das principais tecnologias de suporte à Indústria 4.0.



Fonte – O autor.

Sobre a contribuição de impressoras 3D para a Indústria 4.0, pode-se afirmar que elas são utilizadas em conjunto com tecnologias de escaneamento 3D, robôs autônomos e de prototipagem rápida de

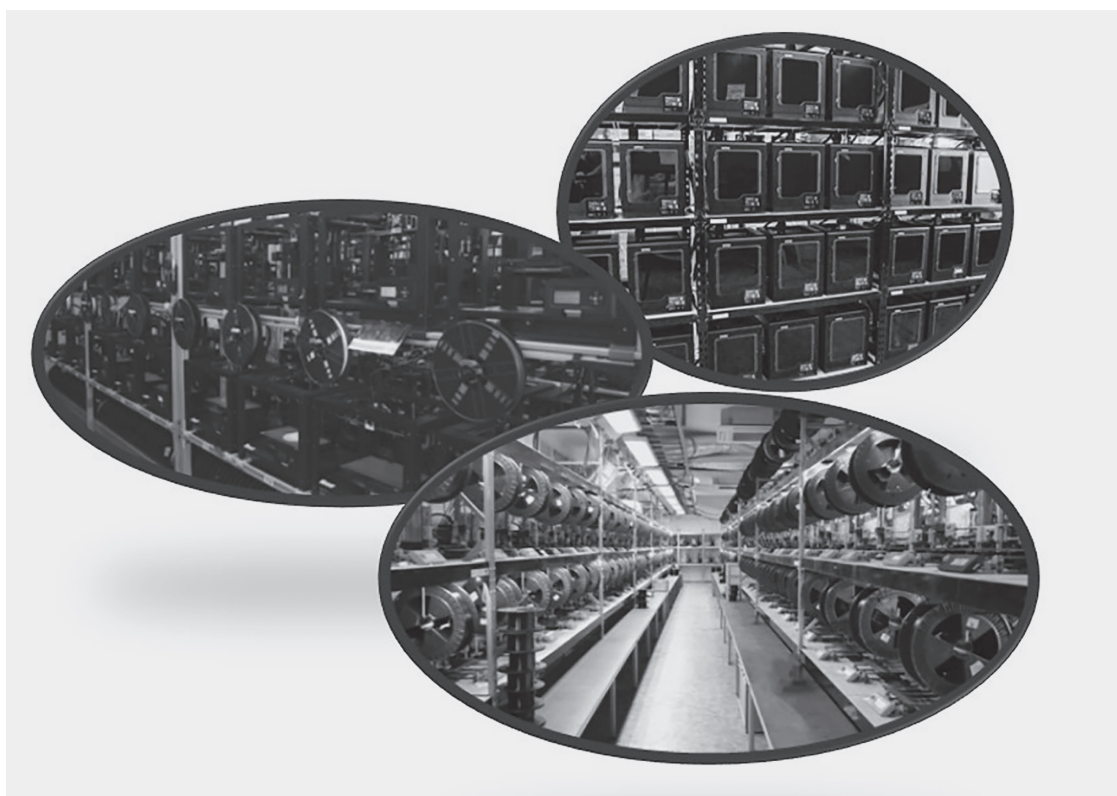
circuitos eletrônicos, como aceleradores de desenvolvimento, assim como recursos produtivos em fases iniciais de comercialização (*startup*) e em início de escalonamento comercial (*scaleup*).

Por outro lado, as impressoras 3D também auxiliam na manutenção do sistema produtivo e do portfólio de produtos, visto que peças de manutenção de equipamentos podem ser fabricadas por meio de tecnologias de impressão 3D.

Outro aspecto que também salienta a utilização de impressoras 3D e projetos *open-source* na Indústria 4.0 é a opção de replicabilidade otimizada e de escalonabilidade de infraestrutura. Aquela pode ser caracterizada como a capacidade de um equipamento ou sistema fabricar outro dele mesmo com maior precisão ou capacidade que o equipamento original.

Nesse caso, também há centros de fabricação distribuídos, onde são produzidos em série equipamentos de impressão 3D e ocorre a prestação de serviços de impressão 3D de forma seriada. Dessa forma, eles apresentam índices de eficiência operacionais altíssimos, como pode ser observado na Figura 14.

Figura 14 – Exemplos de centros de fabricação com mais de 100 impressoras 3D centralizadas em uma sala de 50 m².



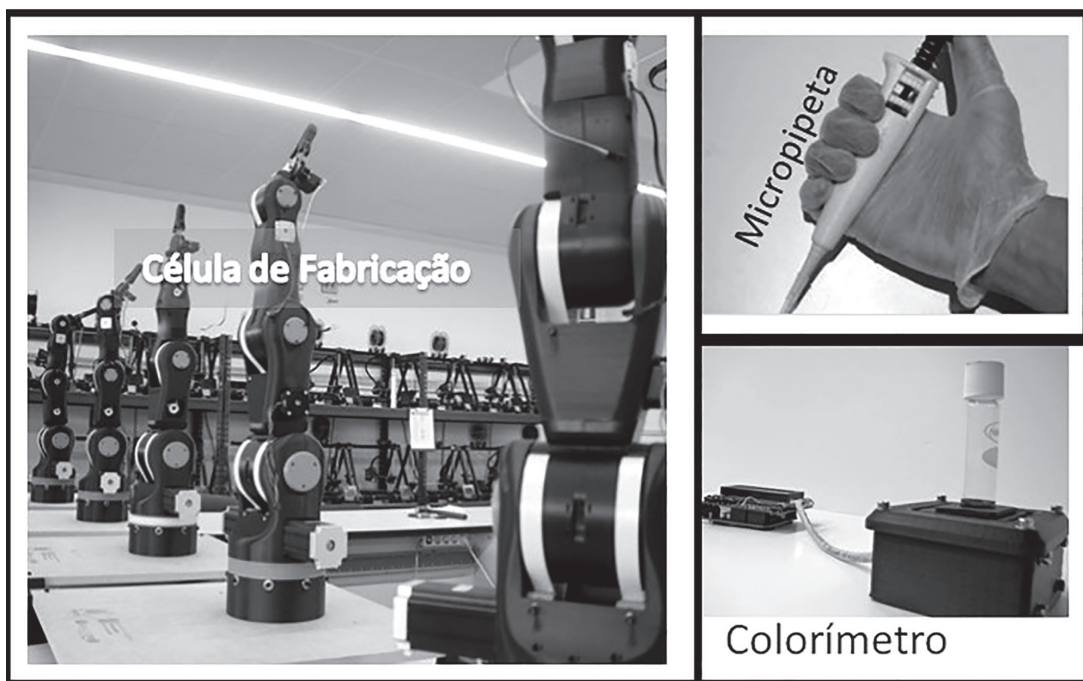
Fonte – O autor.

Nota-se que 100% das impressoras fabricadas nessa célula de fabricação foram produzidas por meio de outra impressora 3D.

Da mesma forma, a escalonabilidade de infraestrutura incita a capacidade de um equipamento de produzir outros equipamentos sem ou com pouca necessidade de processos secundários.

Um exemplo desse tipo de abordagem se dá para pela fabricação de equipamentos complexos, como micropipetas, espectrofotômetros, instrumentos de laboratório (PEARCE, 2013) e também robôs, como apresentado na Figura 15.

Figura 15 – Exemplo de fabricação de braços robóticos com cinco graus de liberdade por meio de célula de impressoras 3D em adição a sistemas laboratoriais *open source*.



Fonte – O autor.

Aplicações fundamentais de impressões 3D na Indústria 4.0

Durante muitos anos, a manufatura aditiva, realizada por meio de impressoras 3D e prototipagem rápida, foi utilizada amplamente com o objetivo exclusivo de fabricação de protótipos. Entre os principais motivos dessa abordagem está o nível de maturidade da tecnologia, além da retenção do conhecimento dessas tecnologias por parte dos fabricantes proprietários das patentes desses processos.

Pode-se também identificar que objetos fabricados por impressoras 3D apresentam características diferentes de objetos fabricados por outros processos, gerando uma barreira cultural para projetistas, *designers* e engenheiros que utilizam tais recursos.

Além disto, tempos de fabricação de impressoras 3D são extremamente mais longos que outros processos, implicando em restrições para a aplicação delas em larga escala.

Por exemplo, se compararmos uma peça fabricada por molde de injeção com uma mesma peça fabricada por impressão 3D FFF, temos uma diferença no *lead time* de 20 segundos (injeção) para duas horas (impressora 3D). Nesse mesmo caso, a resistência mecânica da peça fabricada por impressão 3D é de 70 a 80% menor que a peça injetada, além de apresentar rugosidade em toda sua superfície.

Então por que as impressoras 3D tiveram tal advento e crescimento? Ora, porque o investimento para ferramental e equipamentos de injeção plástica custa cerca de R\$ 150.000,00, enquanto uma impressora 3D de código fonte aberto custa atualmente R\$ 3.000,00 (50 vezes menos).

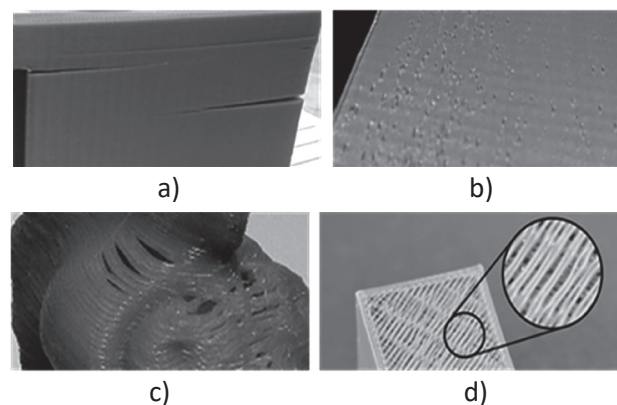
Fabricação de protótipos

Quanto à fabricação de protótipos, as impressoras 3D já vêm ocupando essa cadeira de forma estável. Contudo, pode-se dizer que com a popularização dessa tecnologia ocorreu a desprofissionalização da mão de obra. Com isso, são fabricados produtos com acabamentos questionáveis, quebradiços e que não atendem à necessidade do cliente.

Na Figura 16 são apresentados alguns exemplos de defeitos graves que ocorrem em impressoras do tipo FFF, a saber: a) perda de aderência entre camadas; b) bolhas e heterogeneidade de extrusão; c) falta de preenchimento; d) distância entre filamentos equivocada.

Além desses defeitos, ainda se observa um mercado onde projetos colaborativos em nuvens cresceram mais rapidamente que as técnicas de especificação de produto. Logo, ao realizar um projeto colaborativo ou ao utilizar um modelo 3D de uma nuvem (como a Thingiverse), pode-se enviar esses modelos para dez fabricantes (baseados em impressoras 3D) diferentes. Como consequência, obtêm-se dez peças totalmente diferentes entre si, tanto em relação à geometria quanto ao acabamento e também em relação à resistência mecânica.

Figura 16 – Exemplo de defeitos ocasionados em processos de impressão 3D.



Fonte – O autor.

Por esse motivo, diversos grupos de pesquisa buscam a padronização de informações relacionadas à manufatura aditiva, de forma que seja possível fabricar um componente de forma distribuída com o máximo de repetibilidade e confiabilidade.

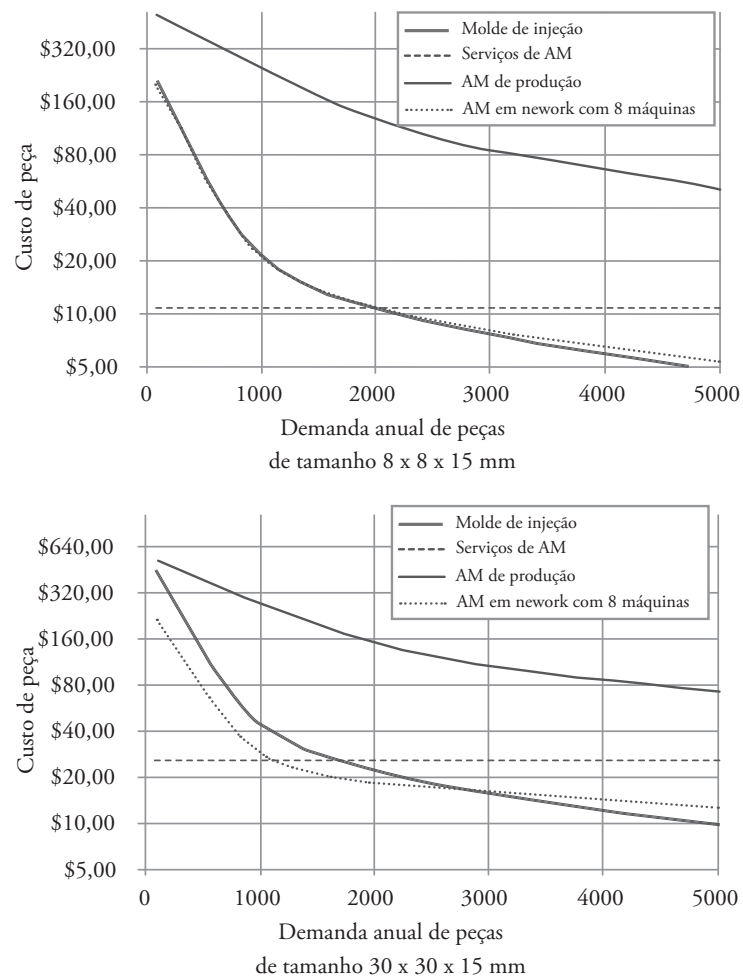
Produção em baixa e média escala

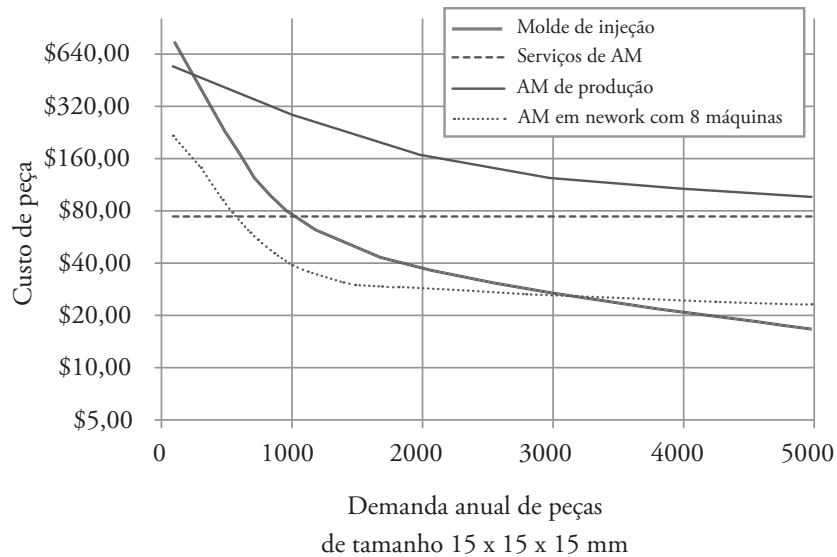
Por outro lado, a fabricação profissional utilizando manufatura aditiva tem benefícios diversos, sendo que diversos estudos indicam a possibilidade de substituição do processo de fabricação convencional para manufatura aditiva no caso de baixos volumes de fabricação.

Por exemplo, a Figura 17 apresenta um comparativo entre o custo de fabricação de peças em três tamanhos distintos que foram produzidas em molde de injeção, por meio de escritórios especializados em manufatura aditiva, equipamentos de manufatura aditiva profissional e célula de manufatura com oito impressoras 3D trabalhando em rede.

Pode-se observar a viabilidade econômica na utilização de impressoras 3D em rede para a demanda anual de 3 mil peças, enquanto escritórios especializados em manufatura aditiva se mostram mais interessantes para volumes anuais inferiores a mil peças.

Figura 17 – Exemplo de amortização de custo de três tamanhos de peça fabricadas por molde de injeção, em comparação com prestadores de serviços de manufatura aditiva, equipamentos de manufatura aditiva de nível profissional e célula de produção com oito impressoras 3D de baixo custo.





Fonte – O autor.

Nesse caso, comparou-se o custo total da operação, sendo considerados os custos de equipamento, mão de obra, aluguel, ferramental, entre outros custos fixos e variáveis.

Pode-se também indicar que nesse caso foi analisado somente o processo de fabricação de peças plásticas; outras características vantajosas de manufatura aditiva não foram colocadas em pauta, como liberdade de forma geométrica e complexidade de objeto.

Sobretudo, pode-se indicar que a flexibilidade de fabricação de produtos complexos sob demanda é um dos pontos mais fortes da manufatura aditiva em comparação com os processos convencionais.

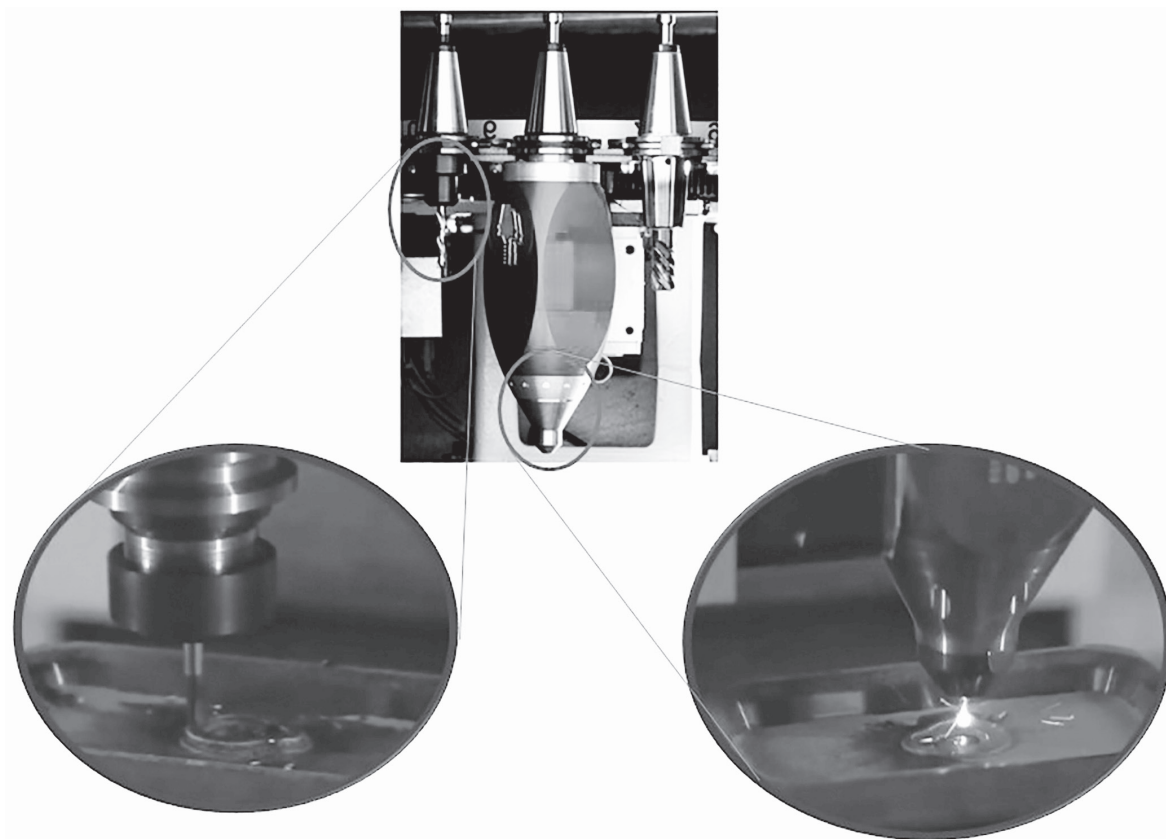
Dessa forma, mercados com baixo e médio volume de produção, que antes eram negligenciados, tomam força de forma competitiva. Adicionalmente, por meio desta e de outras abordagens, criam-se novos mercados ciberfísicos que proporcionam experiências diferenciadas para consumidor, como os conceitos de comercialização B2C.

Para mercados especializados, como aeronáutico e médico, a aplicação de manufatura aditiva se tornou parte integrante do processo de desenvolvimento de produto e de produção. Pode-se indicar que devido ao baixo volume, ferramental e equipamentos de produção especializados encarecem o custo do produto. Em contrapartida, a manufatura aditiva permite manter baixos os custos de fabricação.

Produção híbrida e em larga escala

Outras abordagens de aplicação em indústria se relacionam a processos de fabricação híbridos, nos quais a utilização de métodos de manufatura aditiva e de remoção de material são encontrados no mesmo equipamento. Dessa forma, pode-se aproveitar os benefícios dos processos convencionais sem abrir mão da flexibilidade que a manufatura aditiva permite à fabricação de objetos complexos.

Figura 18 – Exemplo de equipamento CNC com cabeçote intercambiável entre manufatura aditiva por deposição de *laser* (LMD) e fresa.

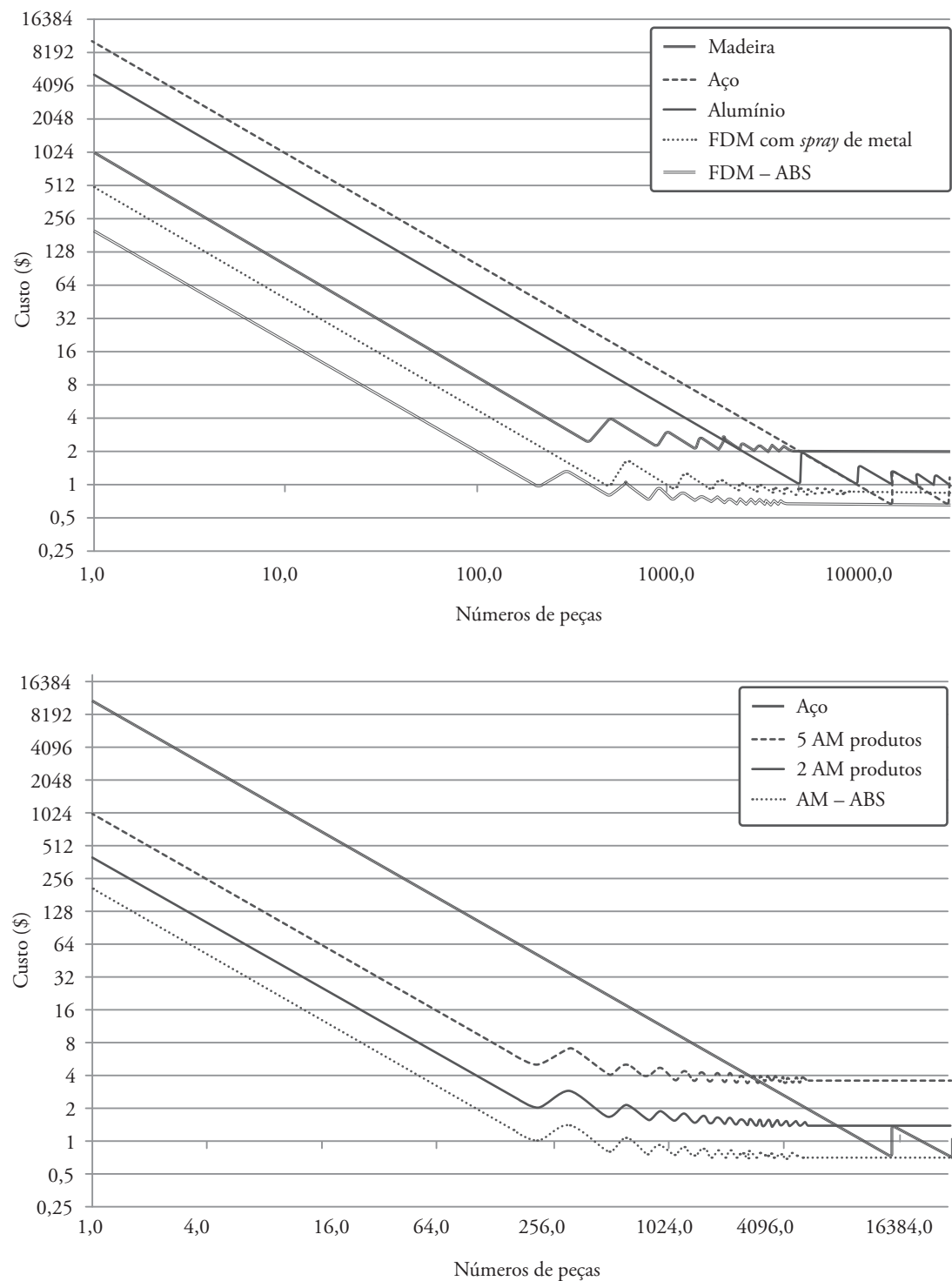


Fonte – O autor.

Outras abordagens de sistemas de produção híbridos também têm sido estudadas, sendo que a fabricação de ferramental e equipamentos de suporte permite a diversificação de portfólio em adição ao aumento de produtividade. A Figura 19 apresenta um comparativo de custo de fabricação por número de peças fundidas em função de processo de fabricação de molde. Nela se pode observar a viabilidade de manufatura aditiva sobre processos convencionais para larga escala. Adicionalmente, pode-se observar a oportunidade de diversificação de portfólio e o aumento de número de produtos. Consequentemente, indica-se o aumento da competitividade e da proximidade com necessidades latentes de clientes.

Nessa abordagem, pode-se também observar um efeito ‘dente de serra’ ao longo da amortização de custo que é ocasionado na finalização da vida útil da ferramenta. A cada dente de serra, tem-se a oportunidade de alterar completamente o produto, de forma a atender novas expectativas e necessidades de clientes.

Figura 19 – Comparação entre processo de fundição por areia verde com fabricação de molde de madeira, molde de aço, molde por FDM com recobrimento metálico e FDM sem recobrimento



Fonte – Cunico; Kai, 2017.

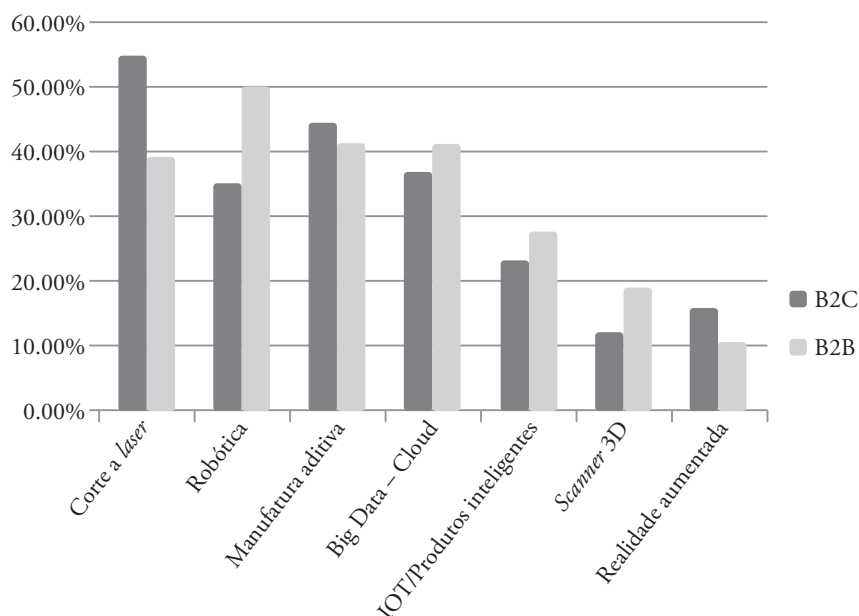
Produção distribuída

Outra abordagem que a manufatura aditiva apresenta em conjunto com a Indústria 4.0 está relacionada ao processo de produção distribuído.

Ao contrário de métodos convencionais, que centralizam meios produtivos para aumentar o volume de produção, essa abordagem se baseia em centros de fabricação distribuídos baseados em Fab Labs. Dessa forma, custos logísticos, de armazenagem, estoque e investimento de infraestrutura são reduzidos de forma que clientes se envolvam mais proximamente ao desenvolvimento e à fabricação.

Pode-se observar, na Figura 20, que tecnologias de corte a *laser*, robótica e manufatura aditiva são atualmente as principais opções para empresas direcionadas ao cliente, visto que permitirem alta customização, além de acelerarem o desenvolvimento de produto, gerar rapidamente *mockups*, protótipos e produzirem em baixa e média escala.

Figura 20 – Análise das principais tecnologias adotadas por empresas em mercados B2B e B2C.



Fonte – Adaptado de Bettiol; Capestro *et al.*, 2017.

Riscos e problemas legais

Embora existam diversos benefícios da aplicação de desenvolvimentos distribuídos e abertos, atualmente há diversas questões jurídicas relacionadas ao assunto, como a responsabilidade técnica pelo produto, a repetibilidade da fabricação, as técnicas de especificação.

Um exemplo clássico pode ser observado em produtos com restrições legais, como armamentos. Esse tema teve maior difusão devido a sua divulgação pela mídia em meados de 2013, quando foi

fabricado um simulacro – o Liberator Handgun, da empresa Defense Distributed (ROBERTS, 2013), que realiza apenas um tiro, causando polêmica ao redor do mundo. (MORELLE, 2013; ROBERTS, 2013; ROMANI, 2013).

Outros aspectos sobre a legalidade de projetos distribuídos estão relacionados à responsabilidade legal sobre os produtos. Por exemplo, ainda existem controvérsias sobre de quem é a responsabilidade por um produto que cause algum tipo de problema, lesão ou incômodo para um consumidor ou usuário de plataformas de projetos em nuvens. Em casos convencionais, a responsabilidade recai sobre o fabricante e revendedor/distribuidor. Contudo, nesse novo cenário, a responsabilidade será dos projetistas (quando o projeto for colaborativo), do fabricante, do fornecedor de matéria-prima ou até do usuário.

Essas questões ainda estão em aberto, sendo discutidas de forma extensivas para identificação de pontos intermediários que não prejudiquem o avanço de uma tecnologia revolucionária e de questões de responsabilidade legal sobre produtos.

CONCLUSÕES

De forma geral, as impressoras 3D são atualmente uma das principais engrenagens que movimentam a Indústria 4.0, ao se considerar que permitem flexibilidade e fabricação de componentes com maior liberdade geométrica que dos processos convencionais, além de suportarem novos mercados.

Neste capítulo, foi evidenciado que as impressoras 3D, em conjunto com processos convencionais, podem proporcionar maior produtividade e flexibilidade de produção que estes isoladamente, quebrando assim com o paradigma produtivo ‘a variedade de produto é inversamente proporcional à produtividade’.

Pode-se também observar que a utilização de equipamentos de manufatura aditiva apresenta a vantagem de replicabilidade e de escalonabilidade de infraestrutura, sendo que por meio de um equipamento de impressão 3D é possível fabricar novos equipamentos mais precisos, além de equipamentos complementares alinhados à necessidade de produção e/ou desenvolvimento.

BIBLIOGRAFIA

BCN3D. BCN3D moveo: a fully open source 3d printed robot arm. **Study Cases**, 2016. Disponível em: <http://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning/>. Acesso em: 17 out. 2019.

BEAMAN, J. J.; DECKARD, C. R. **Selective laser sintering with assisted powder handling**. US patent 4938816, Board of Regents, The University of Texas System, 1990.

BETTIOL, M.; CAPESTRO, M.; DI MARIA, E. Industry 4.0: the strategic role of marketing, In: CONVEGNO ANNUALE SIM, 14, 2017, Bergamo. **Anais...** Bergamo: Universidade de Bergamo, 2017.

- COOPER, K. G. **Rapid prototyping technology selection and application**. New York: CRC Press, 2001.
- CRUMP, S. S. **Apparatus and method for creating three-dimensional objects**. US patent 5121329. Stratasys Inc., 1989.
- CUNICO, M. W. M. Study of FDM process parameter for deposition of filament in area with no support material. EUROPEAN FORUM ON RAPID PROTOTYPING AND MANUFACTURING, 17. 2012, Paris. **Anais...** Paris: Association Française de Prototypage Rapide, 2012.
- CUNICO, M. W. M. **Impressoras 3D: o novo meio produtivo**. Curitiba: Concep3d Pesquisas Científicas, e inserir espaço. 2015.
- CUNICO, M. W. M.; KAI, D. A. Analysis of hybrid manufacturing systems based on additive manufacturing technology. SOLID FREEFORM FABRICATION SYMPOSIUM. [Anais]. Austin 2017
- GIBSON, I. (ed.). **Advanced manufacturing technology for medical applications: reverse engineering, software conversion and rapid prototyping**. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.
- GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing**. New York: Springer, 2010.
- GOTHAIT, H. **Apparatus and method for three dimensional printing**. World International Patent Office, Objet Geometries Inc., 2000.
- HULL, C. W. **Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography**. US patent 4575330, UVP, Inc., 1986.
- LEARY, M. L. *et al.* Optimal topology for additive manufacture: a method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. **Materials & Design** [on-line], n. 63, p. 678-690, 2014.
- LIU, F. W. (ed.). **Rapid prototyping and engineering applications: a toolbox for prototype development**, Boca Raton: CRC Press, 2007.
- MORELLE, R. Working gun made with 3D printer. BBC World. **Science & Environment** [on-line], may 2013.
- ODD Guitars, [s.d.]. Disponível em: <http://www.oddguitars.com/>. Acesso em: 17 out. 2019.
- PEARCE, J. M. **Open-source lab: how to build your own hardware and reduce research costs**. Amsterdam: Elsevier Science, 2013.
- PRINZ, F. B.; ATWOOD, C. L. *et al.* **Rapid prototyping in Europe and Japan**. [S.I.]: Center for Advanced Technology 102, 1997.
- PRUSA, J. Three hundred 3d printers in one room: a quick look to our printing farm. **Prusaprinters blog**, 2018. Disponível em: <https://blog.prusaprinters.org/a-quick-look-to-our-printing-farm/>. Acesso em: 17 out. 2019.
- RICHARDSON, M.; HAYLOCK, B. Designer/maker: the rise of additive manufacturing, domestic-scale production and the possible implications for the automotive industry. **Computer-Aided Design & Applications** [on-line], v. 2, p. 33-48, 2012.
- ROBERTS, D. 3D-printed guns prompt US House to renew prohibition on plastic firearms. **The Guardian** [on-line], 2013. Disponível em: <https://www.theguardian.com/world/2013/dec/04/3d-guns-house-renew-prohibition-plastic-firearms>. Acesso em: 17 out. 2019.

ROMANI, B. Arma feita em impressora 3D gera polêmica; no Brasil, construí-la pode dar cadeia. **Folha de S.Paulo**, maio 2013.

SACHS, E. M.; HAGGERTY, J. S. *et al.* **Three-dimensional printing techniques**. [S.I.]: US patent 5190624A. Massachusetts Institute of Technology, 1989.

SANDERS, R. C.; FORSYTH, J. L. *et al.* **3-D model making**. [S.I.]: US Patent Office, Sanders Prototypes Inc., 1998.

SAURAMO, H. **The proliferation of a new-market disruptive innovation**: case personal 3D printers. 2014. Tese (Mestrado) - Aalto University School of Business, Espoo, Finlândia, 2014. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/80713052.pdf>. Acesso em: 16 out. 2019.

THOMPSON, M. K., G. *et al.* Design for additive manufacturing: trends, opportunities, considerations, and constraints. **DTU Library** [*on-line*], 2016.

VOLPATO, N. (ed.). **Prototipagem rápida**: tecnologias e aplicações. São Paulo: Blucher, 2007.

VOLPATO, N. **Manufatura aditiva**. São Paulo: Blucher, 2017.

YAMAZAKI, T. Development of a hybrid multi-tasking machine tool: integration of additive manufacturing technology with cnc machining. **Procedia CIRP**, v. 42, p. 81-86, 2016.