

COMPARATIVO ENTRE OS DIFERENTES MÉTODOS DE MANUFATURA ADITIVA E AS MELHORIAS NO DESENVOLVIMENTO DE NOVOS PRODUTOS

Diego Vinícius Betim, betimdiego@gmail.com¹

Rodrigo Ferro, rferro@unimep.br¹

¹UNIMEP – Universidade Metodista de Piracicaba, Rodovia Santa Bárbara /Itacemápolis, Km1 – CEP: 13450-000 – Santa Bárbara d'Oeste, SP

Resumo: Atualmente um dos maiores desafios das empresas é entregar o seu produto de maneira rápida e satisfatória ao seu cliente. Quando este produto se trata de algo já desenvolvido e com um sistema de produção definido, este desafio acaba sendo facilitado, já que existem fábricas produzindo de forma contínua determinados produtos. Frente à constante exigência dos mercados consumidores, para que seus produtos possuam características particulares e que atendam a requisitos específicos, tornam-se mais evidentes os desafios diante dos sistemas de produção convencionais. Por conta disso a manufatura aditiva é cotada como uma tecnologia que pretende contribuir com essas especificações. Uma de suas principais vantagens é exatamente a flexibilidade de fabricação direta, a partir de um modelo 3D desenvolvido em um software CAD, sem qualquer restrição de ferramental ou dependência de outro processo. Como se trata de uma tecnologia relativamente nova, o potencial a ser explorado nos próximos anos ainda é enorme e sua abrangência quanto às tecnologias utilizadas e suas aplicações resulta em diversos desafios técnicos e financeiros para cada setor do mercado. Este trabalho tem por objetivo estabelecer um comparativo entre as diferentes técnicas de manufatura aditiva atuais, baseando-se em suas vantagens e desvantagens para as diversas áreas na indústria. É importante entendermos também quais tipos de indústrias são beneficiadas com essa tecnologia, assim como a praticidade da utilização das técnicas da manufatura aditiva no desenvolvimento de produtos e suas novas possibilidades de mercado. Pode-se dizer que é previsível que a manufatura aditiva irá prosperar no desenvolvimento de peças com geometrias complexas, visto seu rápido crescimento na aplicação da prototipagem 3D, sendo importante uma análise mais profunda sobre o grau de investimento e aplicações no novo como conhecer as vantagens de cada técnica assim como seu impacto no produto.

Palavras-chave: manufatura aditiva, prototipagem rápida, software CAD, impressão 3D

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a produção em massa vem perdendo competitividade entre países desenvolvidos e com alta tecnologia, como o mercado europeu, frente a fatores que reduzem o custo fixo em países subdesenvolvidos, tais como custos trabalhistas mais baixos, impostos mais baixos ou proximidade geográfica com as commodities, reduzindo assim o custo final do produto, o que resulta numa necessidade de mudança estratégica para a produção de produtos personalizados e com alto valor agregado em relação à qualidade e desenvolvimento (PETROVIC, 2010).

Assim, um dos maiores desafios das indústrias é entregar o pedido do cliente de forma rápida e satisfatória, e que atenda todas as especificações do produto. Quando se trata de um produto já desenvolvido e com um sistema de produção definido, este desafio se torna um tanto quanto mais fácil, tendo em vista uma estrutura mais sólida da fábrica junto a sua produção seriada. Em contrapartida, quando se trata de produtos personalizados e que atendam a requisitos específicos, esse desafio aumenta, levando em consideração as barreiras encontradas pelos sistemas de produção tradicionais e suas variáveis de produção.

Um exemplo de produto personalizado e com um prazo de fabricação curto, é uma prótese de costelas fabricada pela Anatomics, empresa australiana especializada em implantes, que em poucos dias, conseguiu imprimir um modelo complexo como o sistema ósseo, já que tratava de uma reprodução compatível com medidas do paciente, a partir de um modelo 3D da estrutura óssea removida, que serviu de base para a construção da prótese em titânio totalmente impressa (FORBES, 2015).

Por conta dessas barreiras, a manufatura aditiva (em inglês, *additive manufacturing* - AM) é cotada como uma tecnologia mais eficiente em relação à personalização de produtos, tornando-se interessante para alguns setores industriais, como o biomédico, o aeroespacial e o automotivo (PETROVIC, 2010).

Frente a abrangência de suas diversas aplicações práticas, baseadas na adição de material camada por camada a partir de um modelo 3D, nota-se que essa abordagem é diferente da manufatura tradicional, como a usinagem por exemplo, na qual inicialmente a peça bruta possui um dimensionamento maior comparada ao seu formato final, e produzida a partir da remoção do material excedente através de parâmetros pré-estabelecidos. Em outro exemplo temos os processos de fundição ou injeção que necessitam de um molde para que o material líquido preencha a cavidade e ganhe o formato desejado.

Nos processos de manufatura aditiva, o software de controle da máquina subdivide o modelo 3D em fatias finas até atingir as camadas necessárias para a deposição de material, que serão transmitidas de forma sequencial para a máquina, até que a peça final seja totalmente produzida por meio de adição (PETROVIC, 2011).

Na medida em que os sistemas CAD (*Computer Aided Design*) propiciam a possibilidade de se desenvolver produtos com geometrias cada vez mais complexas, é natural que os processos de fabricação caminhem para o mesmo princípio de evolução, tornando viável as condições para sua produção (FORBES, 2015; PINKERTON, 2016).

Estes problemas podem ser observados tanto na construção das peças quanto na elaboração de um protótipo. Uma vez que, utilizando os processos tradicionais, o tempo e o custo de produção de uma peça única pode comprometer o desenvolvimento de diferentes conceitos na fase de protótipo (PINKERTON, 2016).

Ao analisar a Fig. (1), situação b, nota-se que, em relação à customização, o custo unitário de fabricação torna-se mais viável a partir do ponto de equilíbrio (*breakeven point*) à medida que a complexidade do produto aumenta, comparado à manufatura tradicional (PINKERTON, 2016).

Em efeito contrário, na Fig. (1) situação a, ao se comparar o custo unitário de acordo com o aumento de volume, ainda existe uma vantagem clara da manufatura tradicional sobre a aditiva, visto que a definição de uma alta produção em volume pode variar de indústria para indústria (PINKERTON, 2016).

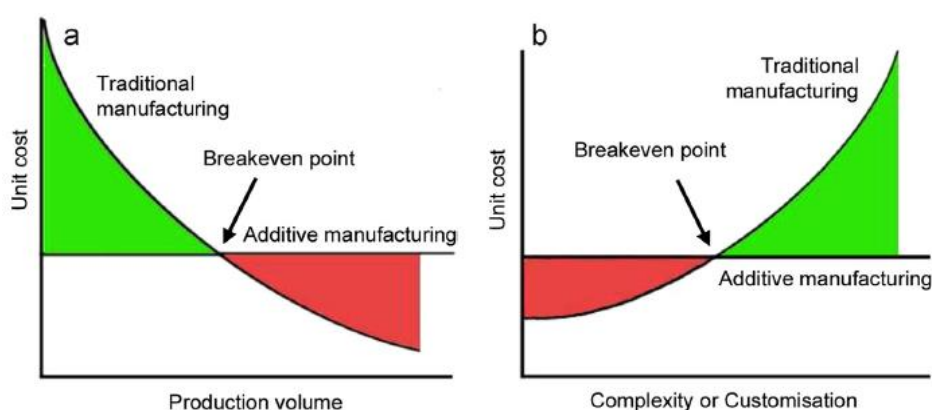


Figura 1. Comparativo entre os custos de produção unitária para manufatura aditiva e tradicional, estabelecido por Pinkerton (2016)

Assim, uma das principais vantagens da manufatura aditiva é exatamente a flexibilidade de fabricação direta a partir de um modelo 3D, sem qualquer restrição de ferramental ou dependência de outro processo (BAUMERS, 2016).

Com isso a abrangência de aplicações pode variar desde uma simples impressão 3D de bancada ou até mesmo na integração da manufatura aditiva no processo produtivo de produtos tradicionais, como uma forma de melhoria de qualidade e agilidade no processo.

Entretanto é importante entender que a AM, mesmo com toda a evolução que ainda está por vir, não deve ser uma tecnologia que substituirá todos os outros processos de fabricação, pelo menos nos próximos anos. É importante identificar a diferença de viabilidade quanto à utilização da AM ou dos processos tradicionais.

Este artigo tem como objetivo estudar os diferentes métodos de fabricação que abrangem a manufatura aditiva, considerando os requisitos: áreas de aplicação, complexidade da superfície, acabamento, tipo de material utilizado, tempo de obtenção, facilidade de produção em escala e precisão. Outro ponto abordado neste trabalho são as expectativas e tendências de utilização da AM para o futuro.

2. MANUFATURA ADITIVA (AM)

Manufatura aditiva (AM) é o termo oficial adotado pela ASTM (2015), para definir o “processo de unir materiais para a produção de objetos a partir de dados de um modelo 3D, geralmente através do empilhamento camada sobre camada, ao contrário de metodologias de fabricação subtrativa. São sinônimos: fabricação aditiva, processos aditivos, técnicas aditivas, fabricação de camadas aditivas, fabricação de camadas e fabricação de formas livres”.

A tecnologia surgiu na década de 1980, com estereolitografia (CRUZ e BORILLE, 2016), e passou a ser utilizada principalmente na prototipagem rápida. Recentemente, com o avanço tecnológico e materiais cada vez mais abrangentes, sua aplicabilidade tem sido voltada para a criação de peças de uso final, trazendo novos benefícios devido a fabricação de camada sobre camada (MELLOR; HAO e ZHANG, 2014).

Holmström et al. (2010) sugere que as características únicas da AM produzem os seguintes benefícios:

- Nenhum ferramental é necessário, reduzindo significativamente o tempo de fabricação e as despesas da produção com o desperdício;
- Pequenos lotes de produção são viáveis e econômicos;

- Possibilidade de mudança rápida no design e personalização do projeto;
- Permite que o produto seja otimizado para a função;
- Viável para cadeias de suprimento mais simples com menores prazos de entrega.

Através desses benefícios, a manufatura aditiva vem ganhando importância recentemente com o desenvolvimento de novas tecnologias de produção que abrangem uma maior variedade de materiais. Estas novas tecnologias permitem novas aplicações na indústria, como por exemplo em setores aeroespaciais, automotivos, medicinal, arqueológico, além da utilização na prototipagem.

As diferenças entre as tecnologias de produção, tanto na manufatura aditiva, quanto na convencional, estão ligadas as restrições de cada máquina de fabricação disponível, bem como o conhecimento de cada tecnologia limitado a poucos profissionais.

Como todo processamento é semelhante, Gibson et al. (2010) define oito etapas fundamentais para a fabricação do modelo: (1) Criação modelo CAD do conjunto de construção principal sem inserções; (2) Conversão do arquivo CAD para STL; (3) Transferência e manipulação do arquivo STL na máquina AM; (4) Setup da máquina; (5) Construção; (6) Remoção e limpeza de peças; (7) Pós-processamento de peças; (8) Aplicação.

Assim, os métodos de AM podem ser organizados em sete tipos diferentes (COTTELEER; HOLDOWSKY e MAHTO), dos quais cinco serão melhor destacados:

- Fotopolimerização: um fotopolímero líquido armazenado em uma cuba é seletivamente curado pela polimerização de luz UV ativa. Uma vez que uma camada está curada, é criada uma nova espalhando por cima do objeto e o processo se repete. Tecnologias relacionadas: SLA e DLP.

- Material de jateamento: um cabeçote de impressão deposita seletivamente o material sobre a área de compilação. Essas gotículas são mais frequentemente compreendidas de fotopolímeros com materiais secundários (por exemplo, cera) usado para criar estruturas de apoio durante o processo de compilação. Uma luz UV solidifica o material para formar peças curadas. Tecnologias: MJM.

- Extrusão de material: o material termoplástico é alimentado através de um bocal aquecido, que ao ser derretido, é depositado em uma plataforma de compilação. Tecnologias: FDM

- Fusão de câmara em pó: partículas de material (por exemplo, plástico, metal) são seletivamente fundidas, usando uma fonte de energia térmica como um laser. Uma vez que uma camada está fundida, é criada uma nova espalhando o pó por cima do objeto e o processo se repete. Tecnologias: EBM, SLS e DMLS

- Câmara de jateamento: partículas de material são unidas seletivamente através de um aglomerante líquido (por exemplo, cola). Tintas também podem ser depositadas para coloração. Uma vez que é formada uma camada, uma nova é criada espalhando o pó por cima do objeto e repetindo o processo. O material não vinculado é usado para suportar o objeto que está sendo produzido, reduzindo assim a necessidade de sistemas de apoio. Tecnologias: 3DP e PJ.

2.1. Estereolitografia (*Stereolithography* - SLA/SL)

Considerada o primeiro processo de prototipagem rápida, sendo desenvolvida na década de 80 pela 3D Systems, a estereolitografia é uma técnica baseada na polimerização de um fotopolímero líquido, onde geralmente é utilizada uma resina fotossensível através de um feixe de laser ultravioleta (MELLO; DA SILVA e DA COSTA, 2006).

O Equipamento de SLA é composto por um recipiente, totalmente preenchido com a resina líquida, onde uma plataforma submersa se move de cima para baixo no eixo Z. O controle numérico da máquina posiciona a plataforma móvel na superfície da resina e o espelho direciona o feixe de luz, através dos eixos x e y, para a primeira camada, que ao ser atingida os fotoiniciadores desencadeiam uma reação na cadeia de moléculas onde os monômeros se agrupam até a sua completa solidificação (MELLO; DA SILVA e DA COSTA, 2006).

O processo se repete camada a camada até que todas se solidifiquem, formando assim a peça final, que após finalizada, é retirada da cuba e submetida a um banho químico para remoção de qualquer excesso de resina decorrente do processo e, em seguida, curada num forno de radiação ultravioleta até atingir a cura completa (MELLOR; HAO e ZHANG, 2014).

2.2. Processamento de Luz Digital (*Digital Light Processing* - DLP)

Similar à SLA, utiliza a fotopolimerização em seu processo, mas é diferenciada pelo uso de um projetor de alta resolução no lugar do laser, equipado com a tecnologia DLP para a emissão de uma projeção luminosa responsável pela solidificação completa da camada de resina (WAGNER, 2012).

O projetor é posicionado sob o recipiente de resina e emite as fatias de imagem para curar cada camada. A imagem projetada é apenas em preto e branco e, uma vez que a resina é sensível aos raios ultravioletas, as áreas brancas da imagem vão direcioná-los para as áreas que necessitam de cura (WAGNER, 2012).

Este método é muito simples quando comparado com a resolução impressionante dos detalhes produzidos pela projeção. O projetor permanece completamente parado durante a impressão (e é importante que ele não se mova para o alinhamento correto das camadas), determinando assim a necessidade de poucas partes móveis e manutenção reduzida

para as máquinas. A única parte móvel é o motor de passo que movimenta a plataforma de construção apenas no eixo Z (ANDERSEN, 2013).

2.3. Modelagem por Jateamento Múltiplo (*Multijet Modeling* - MM/MJM)

Diferente da SLA e DLP, a MJM deposita seletivamente o fotopolímero através de um cabeçote aquecido. Difere também no tempo de cura do material líquido, que se solidifica imediatamente após o contato com a luz UV, impedindo o pós-processamento demorado na câmara. Seu material de suporte possui a forma de cera, que são prontamente dissolúveis em água após o processo (CHAE, 2015).

Seu mecanismo é composto por dois recipientes de alimentação, onde são armazenados os materiais de suporte e de construção, interligados a um cabeçote pré-aquecido, que se movimenta horizontalmente no eixo X e Y, depositando seletivamente o material líquido sobre a plataforma de construção. Cada camada do modelo é formada por gotículas que se solidificam devido à composição do material termoplástico e a luz UV. A plataforma se movimenta no eixo Z, de acordo com a espessura da camada, até a obtenção da peça completa. Finalizada, a peça pode ser removida da plataforma e submetida a um processo de dissolução do material de suporte, que poderá ser reaproveitado para uma nova impressão (MELLO; DA SILVA e DA COSTA, 2006).

2.4. Modelagem por Deposição de Material Fundido (*Fused Deposition Modeling* - FDM)

Considerada a tecnologia de impressão 3D mais comum atualmente e também a mais acessível (CHAE, 2015), seu processo baseia-se na deposição de material sobre camadas, resultantes do aquecimento de filamentos termoplásticos extrudado a partir de um bocal, para a confecção do modelo (LEE; WEI e CHUNG, 2015).

Simultaneamente, outros filamentos fundidos confeccionam os suportes de suspensão do modelo. O equipamento possui uma plataforma com uma base de espuma densa e flexível, que se movimenta verticalmente no eixo Z. O cabeçote é formado por dois bicos extrusores: um para a alimentação das camadas do modelo e outro para a construção dos suportes, e se movimenta no eixo X / Y. Os filamentos são estocados dentro da máquina, em ambiente aquecido, devido à umidade do material dentro do bico extrusor. Os bicos extrusores são alimentados pelos filamentos através de dois carretéis ligados a um motor, responsáveis pela transferência do material. Ao final de cada camada, a plataforma de espuma desce e o cabeçote inicia a deposição de uma nova camada, repetindo o ciclo até a confecção completa da peça. (MELLO; DA SILVA e DA COSTA, 2006).

2.5. Fusão por Feixe de Elétrons (*Electron Beam Melting* - EBM)

Consiste na fundição de uma fina camada de pó metálico através de feixe de elétrons. O equipamento distribui a camada de pó metálico sobre uma plataforma de construção submetida à vácuo, que será fundida devido ao alto calor produzido pelo feixe de elétrons (RÄNNAR; GLAD e GUSTAFSON, 2007). Essa distribuição é realizada por gravidade a partir de duas câmaras laterais de armazenamento. Todo processo é submetido à vácuo devido a fabricação de peças compostas por materiais reativos ao oxigênio.

A leitura de dados é realizada pela própria máquina EBM, que controla o feixe de elétrons a partir de um modelo projetado em sistemas CAD. Deste modo, o controle de coordenadas é realizado para cada camada, assim como o movimento vertical da plataforma de construção que se repete até a confecção completa da peça (BAUDANA, 2016).

Após finalizada, passa por um processo de jateamento de areia para eliminar resíduos superficiais e submetida a processos térmicos para liberar tensões residuais e melhoraria de suas características estruturais. Os processos típicos incluem o tratamento térmico a vácuo, sob gás inerte ou pressão isostática a quente (ADDITIVELY, 2015).

2.6. Sinterização Seletiva à Laser (*Selective Laser Sintering* - SLS)

Neste processo, uma fina camada de partículas pequenas de plástico, metal, cerâmica ou outros compósitos, junto a um aglutinante, será fundida seletivamente pelo laser, explorando seções transversais geradas a partir de uma descrição digital 3D da peça, controlados pelo movimento no eixo X / Y do espelho refletor (KRUTH, 2003).

A máquina SLS pré-aquece o material na câmara de pó, numa temperatura um pouco abaixo do seu ponto de fusão, para facilitar o processo de sinterização pelo laser. Após a sinterização da primeira camada, a plataforma de construção movimenta-se verticalmente para baixo enquanto a câmara é preenchida por uma nova camada do material em pó através de um rolo nivelador. Ao contrário de outras tecnologias, o SLS não necessita de quaisquer estruturas de suporte, pois a peça já é sustentada pelo excesso de pó em cada camada, servindo como apoio natural. Além disso, o pó não sinterizado pode ser reutilizado para um novo processo. Após finalizado, as peças são quebradas fora da câmara de pó e, em seguida, o excesso de pó é removido por um jateamento de areia, a fim de facilitar o acabamento superficial (polimento, moagem, pintura, revestimento) (CHAE, 2015).

2.7. Sinterização à Laser Direto no Metal (*Selective Laser Melting/ Direct Metal Laser Sintering - SLM/DMLS*)

Similar ao SLS, o SLM difere apenas na dimensão das partículas utilizadas para a sinterização e pelo fato de ser um processo livre de ligantes ou agentes fundentes. Assim, todo o material utilizado é completamente fundido pelo feixe de laser, mantendo as propriedades originais do material da peça (ATZENI e SALMI, 2015).

A eliminação do ligante polimérico, combinado com a utilização de camadas mais finas, resulta numa melhor resolução e acabamento final. Esta capacidade permite a produção de peças mais complexas, possibilitando a utilização de outros tipos de materiais como ligas de aço, aço inoxidável, aço ferramenta, alumínio, bronze, cobalto-cromo, e titânio. Outra diferença é a necessidade de estruturas de apoio para ancorar as peças na plataforma de construção, permitindo assim que a transferência de calor seja feita para fora da câmara, reduzindo as tensões térmicas e impedindo o emburulho (ATZENI e SALMI, 2015).

Assim como na SLS, a câmara de construção é alimentada por um braço de recobrimento, que sobrepõe o material da camada anterior para a repetição do processo.

2.8. Impressão 3D (*3D Printing/Binder Jetting - 3DP/BJ*)

Semelhante ao SLS, o dispositivo é formado por uma câmara preenchida com o material em pó, alimentada camada a camada por um rolo a partir da câmara de suprimento. Difere na presença de um cabeçote de impressão que deposita o aglutinante seletivamente nos eixos X / Y, de acordo com os dados emitidos pelo sistema. Após a fusão com o material base, a camada se solidifica e é sustentada pelo pó não fundido, excluindo a necessidade de material extra para os suportes de apoio (GONZALEZ, 2016)

Tornou-se a primeira abordagem de impressão 3D que reduziu o custo das impressoras, que junto à possibilidade de imprimir em várias cores e materiais, e possuir vários cabeçotes para uma impressão mais rápida, ganhou vantagem sobre a FDM em questões de tempo e abrangência do material utilizado (CHAE, 2015).

Ainda assim, existem desvantagens como o acabamento de superficial mais pobre do que SLA ou SLS, devido ao aglutinante e a necessidade de um reforço pós-produção com materiais como cera derretida, cola de cianoacrilato ou epoxi (CHAE, 2015).

2.9. Jateamento de Polímero Foto Sensível (*Photopolymer Jetting - PJ*)

Este processo consiste no jateamento do polímero e realiza a fotopolimerização quase que instantaneamente, devido ao sistema estar todo integrado ao cabeçote (ADDITIVELY, 2015)

Semelhante ao MJM, possui os reservatórios ligados ao cabeçote para a reserva do material líquido, porém com a possibilidade de agregar mais de um material na composição da peça, ou simplesmente de colorações diferentes. Assim, o sistema controla em quais pontos cada material deve ser depositado, bem como a construção do suporte de apoio para a impressão. No pós-processamento, o material de suporte pode ser facilmente removido com água (SOCHOL, 2016).

3. ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS DA MANUFATURA ADITIVA

3.1. Análise do tipo de impressão

Após o levantamento de dados e a análise dos quesitos referente aos produtos fabricados em cada tecnologia, foram avaliados: a facilidade de se trabalhar com superfícies complexas, o acabamento e precisão obtidos pós operação, os tempos de fabricação e a capacidade de produção em escala, e organizados na Tab. (1).

Nota-se uma tendência muito positiva com relação à complexidade de design, visto que, por se tratar de uma manufatura de adição, a AM trabalha diretamente com os sólidos 3D a partir do sistema CAD/CAM/CAE, que elimina as limitações de ferramentas presentes na manufatura convencional, possibilitando a fabricação de geometrias complexas em um tempo reduzido durante o desenvolvimento de produto e também apresenta uma redução ou até mesmo a eliminação dos desperdícios e resíduos decorrentes da produção, resultando em um processo mais eficiente.

Em contrapartida, ainda existem limitações quanto à velocidade de produção em larga escala, como já abordado anteriormente por Pinkerton (2016), onde foi definido o ponto de equilíbrio entre as manufaturas. Essa desvantagem é resultado de características específicas de cada tecnologia, como por exemplo o tempo de cura para a SLA e DLP; os tempos de produção da MJM e o acabamento da FDM e EBM; o tamanho do pó utilizado para a sinterização na SLS, DMLS e 3DP, impactando na precisão. As vantagens e desvantagens de cada tecnologia foram agrupadas na Tab. (2).

Tabela 1. Comparativo entre características de impressão

Processos	Complexidade da Superfície	Acabamento	Velocidade de Produção	Produção em Escala	Precisão
SLA	[2]	[1]	[1]	[1]	[2]
DLP	[3]	[3]	[5]	[5]	[4]
MJM	[11]	[7]	[7]	[8]	[7]
FDM	[8]	[1]	[8]	[1]	[6]
EBM	[10]	[10]	[11]	[11]	[10]
SLS	[7]	[1]	[8]	[1]	[1]
DMLS	[9]	[6]	[11]	[9]	[6]
3DP	[11]	[7]	[12]	[12]	[7]
PJ	[1]	[11]	[1]	[1]	[6]

Alta / Excelente
 Bom
 Médio
 Razoável
 Baixa / Ruim

Fontes: ^[1] PATERSON (2015); ^[2] KATARIA e ROSEN (2001); ^[3] WALLACE (2014); ^[4] ANDERSEN (2013);
^[5] WAGNER (2012); ^[6] MANÇANARES (2015); ^[7] CHAE (2015); ^[8] MELLO, DA SILVA e DA COSTA (2015);
^[9] SALMI (2012); ^[10] BAUDANA (1016); ^[11] ADDITIVELY (2015); ^[12] DELOITTE (2015);

Tabela 2. Comparativo entre as vantagens e desvantagens de cada tecnologia estabelecidos pela Deloitte (2015) e Additively (2015)

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
SLA	Geometrias complexas; detalhamento superficial; tamanho variado de peças;	Pós-cura necessária; processamento lento; requer estruturas de apoio em alguns casos;
DLP	Geometrias complexas; alta precisão; tamanho variado de peças;	Espessuras limitada do produto; gama limitada de materiais
MJM	Boa precisão no acabamento; pode usar múltiplos materiais e cores;	Gama limitada de materiais; processamento lento; peças frágeis;
FDM	Peças funcionais, com boas propriedades mecânicas; geometrias complexas;	Baixo grau de detalhamento; camadas visíveis; processamento lento;
EBM	Metais de alta densidade; menor tensão térmica comparado à sinterização; processamento rápido;	Pós-processamento; acabamento superficial regular, comparado à sinterização; processo caro;
SLS	Peças funcionais, com boas propriedades mecânicas; ampla gama de materiais; processamento rápido; baixo custo para pequenos lotes;	Precisão limitada ao tamanho da partícula do pó; acabamento superficial regular;
DMLS	Metais de alta densidade; boas propriedades mecânicas;	Pós-processamento; processo caro e lento;
3DP	Baixo custo; variedade de cores; processamento rápido; pó reutilizável.	Peças frágeis devido ao processamento das partículas;
PJ	Modelos de cores; baixo custo; rápido para construir	Precisão limitada; pobre revestimento de superfície

3.2. Materiais

Com a evolução da tecnologia e variação dos diferentes tipos de impressoras e aplicações para cada produto, pode-se destacar alguns materiais mais abrangentes em cada processo, como os polímeros, metais, cerâmicas e compósitos. Conforme a abrangência de materiais aumenta, a manufatura aditiva torna-se mais viável e com um maior grau de exploração para o desenvolvimento de novos produtos, uma vez que essa variabilidade está diretamente ligada às propriedades mecânicas de cada material, que em muitos casos, é limitada pela manufatura tradicional devido à necessidade do ferramental específico ou ainda o elevado desperdício de materiais durante o processo de remoção.

Tabela 3. Materiais especificados pela Deloitte (2015) e Additively (2015)

	SLA	DLP	MJM	FDM	EBM	SLS	DMLS	3DP	PJ
Polímeros	X	X	X	X		X	X	X	X
Metais					X	X	X	X	X
Cerâmicas	X					X		X	
Compósitos	X		X	X		X		X	

3.3. Áreas de Aplicação

Por fim, diante de uma gama muito maior de diferentes tecnologias e soluções, bem como a utilização de novos materiais e ligas para o desenvolvimento de novos produtos, a manufatura aditiva avança em diversos setores da indústria e se distancia cada vez mais da exclusividade da prototipagem rápida e da impressão 3D apenas para o consumo de pequeno porte. Diversas aplicações na indústria medicinal ganham destaque, como a fabricação de próteses cada vez mais adequadas às particularidades do paciente, e as pesquisas para a impressão de órgãos através de cadeias celulares.

Tabela 4. Áreas de aplicação da AM, listados nos sites Deloitte (2015) e Kearney (2015)

IND.	APLICAÇÕES ATUAIS	APLICAÇÕES FUTURAS
AEROESPACIAL	• Conceito modelagem e prototipagem; • Peças de produção estruturais e não estruturais; • Peças de reposição de baixo volume; • Peças especializadas para a exploração espacial;	• Incorporação da AM eletrônica diretamente nas peças; • Peças de mecanismos complexos; • Outros componentes estruturais de aeronaves; • Demanda de partes/peças de reposição; • Estruturas criadas diretamente no espaço;
AUTOMOTIVA	• Prototipagem rápida e fabricação das peças de uso final dos automóveis; • Peças e conjuntos para carros antigos e carros de corrida; • Design inovador para chassis;	• Auto componentes sofisticados; • Auto componentes projetados através crowdsourcing; • Estruturas mais leves e resistentes;
MEDICINAL	• Próteses e implantes; • Modelos e instrumentos médicos; • Aparelhos auditivos e implantes dentários;	• Desenvolvimento de órgãos para transplantes; • Larga escala de produção farmacêutica; • Desenvolvimento de tecidos humanos para terapias regenerativas;
CONSUMIDOR	• Prototipagem rápida; • Criar projetos iterativos; • Relógios e joias personalizados; • Personalização limitada do produto;	• Co-projetar e criar com clientes; • Ambientes pessoais personalizados; • Crescente customização em massa de produtos de consumo; • Acessórios de vestuário e moda;

4. EXPECTATIVAS FUTURAS DA TECNOLOGIA

Desde a revolução industrial aprendemos a produzir coisas de forma rápida e barata, com o intuito de facilitar nossas atividades do dia a dia. Nos últimos 30 anos houve um avanço incessante na aplicação da AM, devido à sua facilidade de uso, custo e adoção em diversos setores industriais, desempenhando um papel cada vez mais dominante no desenvolvimento, na cadeia de valor de fabricação e na personalização de novos produtos.

Embora a AM ainda apresente um custo superior em relação aos métodos tradicionais de manufatura, observa-se uma economia significativa com o aproveitamento de materiais, uma vez que os processos de remoção geram resíduos, o que pode ser substancial para empresas que utilizam metais mais densos e de alto custo, como o titânio, para a manufatura de produtos. Outra vantagem crucial é a possibilidade de alterar as microestruturas à medida que os materiais são processados, de forma que, em um ambiente de testes, propriedades mecânicas como resistência e flexibilidade possam ser obtidas a partir de aproveitamento maior de material sem que exista limitações de geometria ou necessidade de montagem futura. Por exemplo, pode-se obter uma mistura de dois ou mais polímeros para a manufatura de um produto de forma que uma determinada região apresente uma rigidez maior e gradativamente, outra região apresente uma transição mais suave e elástica na mesma peça.

Essa liberdade em relação ao design, é importante não só para a economia de materiais, mas também permite o desenvolvimento de novas geometrias, visando reduções de peso e melhorias na aerodinâmica e resistência do produto.

Assim, a ideia da impressão 3D se fortalece com o avanço tecnológico do micro para o macro, onde a praticidade da fabricação tende a ser direcionada para a produção em larga escala, visando dimensões como a redução do lead time e desperdícios no processo, aumento da customização e simplificação da cadeia de produção.

Em setembro de 2016 a General Electric (GE) anunciou a compra de duas empresas de impressão em 3D por US\$ 1,4 bilhão, com o objetivo de produzir partes metálicas de motores através da manufatura aditiva. Outra parceria importante para o setor foi estabelecida entre a Siemens e Stratasys, também em 2016, com o objetivo de incorporar a manufatura aditiva na produção em massa e fortalecer seus benefícios a partir de melhorias de software e de toda a cadeia de valor da indústria.

Segundo a Wohlers Associates, consultora independente no mercado de novos desenvolvimentos e tendências da prototipagem rápida, manufatura aditiva e impressão 3D, em sua mais recente análise abrangente em relação à impressão 3D em todo o mundo, avaliou que esta indústria continua a evoluir para além das expectativas de muitos, crescendo em torno de US\$ 1 bilhão por dois anos consecutivos. Estima-se um aumento de 25% do investimento entre 2014 e 2020 na prototipagem rápida, e uma ampliação significativa nos principais setores industriais. Desta forma, espere-se que o break-even point da manufatura aditiva se aproxime da manufatura tradicional, de forma que os custos com a produção em massa sejam reduzidos nos próximos anos.

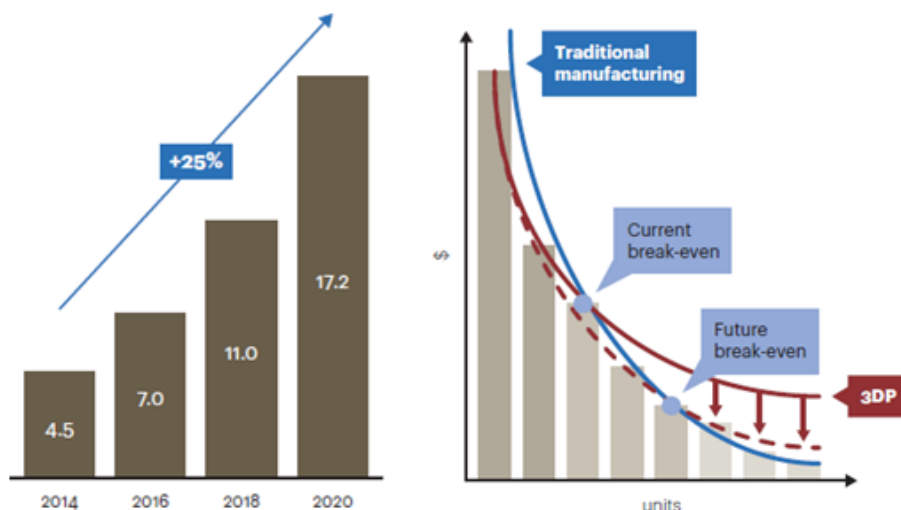


Figura 2. Previsão do aumento de investimento e aproximação do break-even realizado pela Kearney (2015)

Esse aumento significativo demonstra o avanço da indústria aditiva nos últimos anos e o impacto diante das mudanças que englobam tanto softwares CAD/CAM, adaptados a cada ano para projetar produtos e fornecer os dados às impressoras, tornando-os capazes de se adequar a uma "expressividade infinita" de novas possibilidades no desenvolvimento de produtos. Assim, novos desenvolvimentos em design generativo, aprendizado de máquina e análise física multidimensional, que junto com avanços em materiais de impressão 3D e melhoria contínua nas impressoras, darão à indústria de manufatura sistemas mais experientes e de fácil manipulação (NEWTON, 2015).

5. CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho foi possível compilar as informações das diferentes tecnologias utilizadas na manufatura aditiva, na qual se observa as vantagens e as características de cada uma delas em relação aos requisitos: áreas de aplicação, complexidade da superfície, acabamento, tipo de material utilizado, tempo de obtenção, facilidade de produção em escala e precisão.

Outro ponto trabalhado neste artigo se referiu à análise das tendências de utilização desta tecnologia no futuro, na qual é importante ressaltar os investimentos que diversas empresas de tecnologia fizeram para conseguirem meios de trabalhar no desenvolvimento ou na utilização da manufatura aditiva em seus processos de fabricação, o que aponta uma tendência de expansão da utilização desta tecnologia para os próximos anos.

6. REFERÊNCIAS

- ADDITIVELY, 2015. Additively – your access to 3D printing. Disponível em <<http://www.additively.com>>. Acesso em: 9 abr. 2016.
- ANDERSEN, U. V. et al. In-process 3d geometry reconstruction of objects produced by direct light projection. The international journal of advanced manufacturing technology, [S.L.], v. 68, p. 565-573, set. 2013.
- ASTM, 2015. F2792–12a Standard terminology for additive manufacturing technologies (Withdrawn 2015). Disponível em: <<http://www.astm.org/Standards/F2792.htm>>. Acesso em: 16 jul. 2016.
- ATZENI, Eleonora; SALMI, Alessandro. Study on unsupported overhangs of AlSi10Mg parts processed by Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Journal of Manufacturing Processes, [S.L.], v. 20, p. 500-506, out. 2015.
- BAUDANA, G. et al. Electron Beam Melting of Ti-48Al-2Nb-0.7Cr-0.3Si: Feasibility investigation. Intermetallics, [S.L.], v. 73, p. 43-49, mar. 2016.
- BAUMERS, M. et al. The cost of additive manufacturing: machine productivity, economies of scale and technology-push. Technological Forecasting & Social Change, [S.L.], v. 102, p. 193-201, jan. 2016.
- CHAE, M. P. et al. Emerging applications of bedside 3D printing in plastic surgery. Frontiers, [S.L.], jun. 2015.
- COTTELEER, Mark; HOLDOWSKY, Jonathan; MAHTO, Monica. The 3D opportunity primer. Deloitte University Press, [S.L.], mar. 2014. Disponível em: <<https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/the-3d-opportunity-primer-the-basics-of-additive-manufacturing.html>>. Acesso em: 12 mar. 2016.
- CRUZ, Marcio; BORILLE, Anderson. Decision methods application to compare conventional manufacturing process with metal additive manufacturing process in the aerospace industry. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, [S.L.], p. 1-17, abr. 2016.
- DELOITTE, 2015. Disponível em: <<https://dupress.deloitte.com/dup-us-en/focus/3d-opportunity/the-3d-opportunity-primer-the-basics-of-additive-manufacturing.html>>. Acesso em: 9 abr. 2016.
- FORBES, 2015. Forbes welcome. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/amitchowdhry/2015/09/19/how-surgeons-implanted-3d-printed-titanium-ribs-in-a-cancer-patient>>. Acesso em: 19 mar. 2016.
- FORBES, 2016. Wohlers Report 2016: 3D Printing Industry Surpassed \$5.1 Billion. Disponível em: <<http://www.forbes.com/sites/tjmccue/2016/04/25/wohlers-report-2016-3d-printer-industry-surpassed-5-1-billion/>>. Acesso em: 21 set. 2016.
- GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. [S.L.]: Springer, 2014. 484 p.
- GONZALEZ, J. et al. Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. Ceramics International, [S.L.], v. 42, p. 10559-10564, jul. 2016.
- HOLMSTRÖM, J. et al. Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. Journal of Manufacturing Technology Management, [S.L.], v. 21, p. 687 - 697, jan. 2010.
- KATARIA, Alok; ROSEN, David W.. Building around inserts: methods for fabricating complex devices in stereolithography. Rapid Prototyping Journal, [S.L.], v. 7, p. 253-262, jan. 2001.
- KEARNEY, 2015. Disponível em: <<https://www.atkearney.com/documents/10192/5992684/3D+Printing+A+Manufacturing+Revolution.pdf/bf8f5c00-69c4-4909-858a-423e3b94bba3>>. Acesso em: 10 out. 2016.
- KRUTH, J. et al. Lasers and materials in selective laser sintering. Assembly Automation, [S.L.], v. 23, p. 357-371, 2003.
- LEE, Wei-chen; WEI, Ching-chih; CHUNG, Shan-Chen. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining. Journal of Materials Processing Technology, [S.L.], v. 214, p. 2366-2374, nov. 2014.
- MANÇANARES, C. G. et al. Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, [S.L.], v. 80, p. 1007-1014, set. 2015.
- MELLO, C.H.P.; DA SILVA, C.E.S.; DA COSTA, S.C. Comparação de três diferentes tecnologias de prototipagem rápida em relação a critérios de custo e tempo. XXVI ENEGEP. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2006_TR490328_7839.pdf>, 2006. Acesso em: jun. 2016.

- MELLOR, Stephen; HAO, Liang; ZHANG, David. Additive manufacturing: a framework for implementation. International journal of production economics, [S.L.], v. 149, p. 194-201, mar. 2014.
- NEWTON, R. Casting a Positive Global View on 3D Printing. Rapid Ready Technology. Disponível em: <<http://www.rapidreadytech.com/2015/09/casting-a-positive-global-view-on-3d-printing/>>, 2015. Acesso em: 12 out. 2016.
- PETROVIC, V. et al. Additive layered manufacturing: sectors of industrial application shown through case studies. International Journal of Production Research, [S.L.], v. 49, p. 1061-1079, fev. 2010.
- PATERSON, A. M. et al. Comparing additive manufacturing technologies for customised wrist splints. Rapid Prototyping Journal, [S.L.], v. 21, p. 230-243, 2015.
- PINKERTON, Andrew. [INVITED] Lasers in additive manufacturing. Optics & Laser Technology, [S.L.], v. 78, p. 25-32, abr. 2016.
- RÄNNAR, L-E.; GLAD, A.; GUSTAFSON, C-G.. Efficient cooling with tool inserts manufactured by electron beam melting. Rapid Prototyping Journal, [S.L.], v. 13, p. 128-135, 2007.
- SALMI, M. et al. Patient-specific reconstruction with 3D modeling and DMLS additive manufacturing. Rapid Prototyping Journal, [S.L.], v. 18, p. 209-214, 2012.
- SOCHOL, R. D. et al. 3D printed microfluidic circuitry via multijet-based additive manufacturing. Lab on a Chip, [S.L.], v. 16, p. 668-678, fev. 2016.
- WAGNER, T. et al. Development and characterisation of a compact light-addressable potentiometric sensor (laps) based on the digital light processing (dlp) technology for flexible chemical imaging. Sensors and actuators b: chemical, [S.L.], v. 170, p. 34-39, jul. 2012.
- WALLACE, J. et al. Validating continuous digital light processing (cDLP) additive manufacturing accuracy and tissue engineering utility of a dye-initiator package. IOP Science, [S.L.], jan. 2014.
- WOHLERS ASSOCIATES, 2016. Disponível em: <<https://wohlersassociates.com>>. Acesso em: 16 set. 2016.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído deste trabalho.

COMPARATIVE BETWEEN DIFFERENT ADDITIVE MANUFACTURING METHODS AND NEW PRODUCTS DEVELOPMENT IMPROVEMENTS

Diego Vinícius Betim, betimdiego@gmail.com¹

Rodrigo Ferro, rfferro@unimep.br¹

¹UNIMEP – Universidade Metodista de Piracicaba, Rodovia Santa Bárbara /Iracemápolis, Km1 – CEP: 13450-000 – Santa Bárbara d'Oeste, SP

Abstract: *One of the biggest challenges for companies is to deliver their products in a quick and satisfactory way. When it comes to a product that has already been developed in a defined production system, it's more ease to produce, since there are factories continuously producing such products. With the constant demand of the consumer markets for their products to have characteristics and meet specific requirements, the challenges facing conventional production systems became more evident. Thus, additive manufacturing is considered as a technology that intends to contribute to these specifications needs. One of its main advantages is exactly the flexibility of direct manufacturing from a 3D model, developed in a CAD software, without any restriction of tools or dependence of another process. As it is a relatively new technology, the potential to be exploited in the coming years is still wide, and its comprehensiveness regarding the technologies used and their applications, results in several technical and financial challenges for each sector. This work aims to establish a comparison between different current additive manufacturing techniques, based on their advantages and disadvantages for some areas in the industry. It is also important to analyze what types of industries can have benefits with this technology, as well as the practicality of the use of additive manufacturing techniques in product development and its new market possibilities with complex geometries, given its rapid growth in the application of 3D prototyping, being important a deeper analysis on the degree of investment and applications in the new how to know the Advantages of each technique as well as its impact on the product. Predictably additive manufacturing will thrive in the development of parts with complex geometries, given its rapid growth in the application of 3D prototyping. It is important a deeper analysis on the investments and applications needed and knowing the advantages of each technique as well as its impact on the product.*

Keywords: *additive manufacturing, rapid prototyping, CAD software, 3D print*

COPYRIGHT

The authors of this paper are the only responsible for it's content.