

Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações

Additive manufacturing: state-of-the-art and application framework

Vinícius Picanço Rodrigues¹ - Section of Engineering Design and Product Development - Dep. of Mechanical Engineering - Technical University of Denmark

Eduardo de Senzi Zancul² - Dep. de Eng. de Produção - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

Cauê Gonçalves Mançanares³ - Dep. de Eng. de Produção - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

Caio Mezzeti Giordano⁴ - Dep. de Eng. de Produção - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

Mario Sergio Salerno⁵ - Dep. de Eng. de Produção - Escola Politécnica - Universidade de São Paulo

RESUMO

Manufatura aditiva compreende uma classe de processos de produção com aplicação crescente em diversas áreas e cadeias produtivas. Devido à flexibilidade para a produção em baixos lotes e versatilidade de materiais e geometrias, essa tecnologia é tida como capaz de revolucionar processos produtivos e de alterar estratégias de produção atualmente empregadas. Entretanto, sob o rótulo genérico de manufatura aditiva existem diferentes tecnologias, materiais e áreas de aplicações, com requisitos diferentes. Tendo em vista a crescente importância da manufatura aditiva como processo de produção e considerando a necessidade de se ter maior discernimento sobre potenciais aplicações para o direcionamento de esforços de pesquisa e de desenvolvimento, este artigo apresenta uma proposta de organização das aplicações da manufatura aditiva em sete áreas. Adicionalmente, o artigo traça um panorama do estágio atual de desenvolvimento da tecnologia, com uma revisão das principais variantes tecnológicas. Os resultados apresentados servem como base para auxiliar o direcionamento de iniciativas na área de manufatura aditiva tanto em empresas como em órgãos de fomento e em instituições de pesquisa.

Palavras-chave: Manufatura aditiva. Tecnologia de produção. Inovação em manufatura.

ABSTRACT

Additive manufacturing encompasses a class of production processes with increasing applications in different areas and supply chains. Due to its flexibility for production in small batches and the versatility of materials and geometries, this technology is recognized as being capable of revolutionizing the production processes as well as changing production strategies that are currently employed. However, there are different technologies under the generic label of additive manufacturing, materials and application areas with different requirements. Given the growing importance of additive manufacturing as a production process, and also considering the need to have a better insight into the potential applications for driving research and development efforts, this article presents a proposal of organization for additive manufacturing applications in seven areas. Additionally, the article provides a panorama of the current development stage of this technology, with a review of its major technological variants. The results presented aim to serve as a basis to support driving initiatives in additive manufacturing in companies, development agencies and research institutions.

Keywords: Additive manufacturing. Production technology. Manufacturing innovation.

1. Produktionstorvet, Building 426, 2800, Kgs. Lyngby, Denmark, vipiro@dtu.dk; 2. ezancul@usp.br; 3. cmancanares@gmail.com;

4. caio_giordano@hotmail.com; 5. msalerno@usp.br

RODRIGUES, V. P.; ZANCUL, E. S.; MANÇANARES, C. G.; GIORDANO, C. M.; SALERNO, M. S. Manufatura aditiva: estado da arte e framework de aplicações. **GE-PROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 12, nº 3, jul-set/2017, p. 1-34.

DOI: 10.15675/gepros.v12i3.1657

1. INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva se caracteriza pelo emprego de equipamentos capazes de fabricar objetos por meio da adição de material, camada por camada, a partir de um modelo digital tridimensional (3D), usualmente obtido por meio do emprego de um sistema CAD (*Computer Aided Design*). Assim, tem-se o conceito de produção por adição de material em contraste à produção por métodos convencionais, em que a peça é obtida pela retirada de material, como na usinagem.

Os primeiros equipamentos de manufatura aditiva foram máquinas de prototipagem rápida (*rapid prototyping*), que começaram a surgir a partir da década de 1980. O termo prototipagem rápida provém de uma das finalidades dessas máquinas: produzir protótipos tridimensionais de produtos de uma maneira rápida e generalizada (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012). Entretanto, hoje em dia, esses equipamentos não se limitam simplesmente à produção de protótipos, ingressando na manufatura final de produtos e “depositando” uma gama maior de materiais, incluindo plásticos, cerâmicas e ligas metálicas. Assim, a terminologia mais usual no âmbito técnico e adotada pela ASTM (*American Society for Testing and Materials*) é manufatura aditiva (*additive manufacturing*) (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2009; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012).

Características fundamentais da manufatura aditiva são a redução do número de etapas e processos na fabricação de um objeto, a economia de material e a possibilidade de combinação inéditas geometria – materiais, eventualmente mais de um na mesma peça. Para a produção de uma única peça de geometria complexa por meios convencionais, pode ser necessário o emprego de diversas máquinas, ferramental específico e de diversos processos de usinagem e de acabamento até o produto final, enquanto que uma máquina de manufatura aditiva pode produzir a peça em uma única etapa ou em um número significativamente menor de etapas. Uma vez que a peça é produzida por deposição de material, camada por camada, não haveria desperdício de materiais, como é o caso de cavacos produzidos pela usinagem. Assim, a manufatura aditiva serve como meio de *designers* e projetistas produzirem protótipos de seus projetos para testá-los ou apresentá-los a colaboradores ou clientes de maneira rápida e eficiente. Serve também para a produção de bens complexos, como próteses médicas personalizadas e, cada vez mais, mostra-se como um integrante da cadeia produtiva na indústria (HOPKINSON; HAGUE; DICKENS, 2006; STRANO et al., 2013; GUO; LEU, 2013).

As aplicações com sucesso da manufatura aditiva, e consequente avanço na digitalização da produção na indústria, levaram meios de comunicação como a revista *The Economist* a ressaltarem a transformação dos meios de produção causadas por estas tecnologias. Para a *The Economist* (2012), avanços em manufatura aditiva poderão levar a uma nova revolução industrial, ressaltando-se o fato de esta tecnologia não envolver economias de escala, ou seja, como não há escala mínima de produção para que esta seja economicamente viável, os custos seriam quase que totalmente variáveis (matéria-prima, energia etc.): isso significa que obter-se-ia praticamente o mesmo custo unitário de produção de uma peça seja ela sendo produzida em uma única unidade ou em milhares de unidades. Já a revista *Wired* (2012) ressaltou a transformação no mercado de bens de consumo que a manufatura aditiva pode trazer, com produção de produtos tanto em âmbito local (*local print*), por “impressoras 3D” instaladas nas casas de consumidores, quanto em âmbito global (*global print*).

O mundo acadêmico não fica atrás: uma busca pelo tópico “*additive manufacturing*” na base *Web of Science* restrita a documentos do tipo *article* retornou 898 textos em 24/03/2015, com número crescente de publicações a partir de 2008. A grande maioria dos textos são relativos às questões tecnológicas (estudos sobre aprimoramento de processos, novos processos, transferência de calor etc.), com poucos textos envolvendo temas de gestão tecnológica e assemelhados. Segundo Levy (2010), a manufatura aditiva é um processo de fabricação relativamente novo e com interesse crescente na área de engenharia. No entanto, estudos sobre seus processos, aplicações e implicações são ainda incipientes, de modo que existem diversas lacunas a serem supridas neste campo de pesquisa (GUO; LEU, 2013). Ou seja, trata-se de um tema emergente e pouco estudado, o que indica a necessidade de ensaio para ajudar na estruturação da reflexão sobre as potencialidades, restrições e possibilidades de difusão da manufatura aditiva, bem como a indicação de linhas de pesquisa que possam ser seguidas.

O *framework* de aplicações de manufatura aditiva apresentado neste artigo é resultado de um esforço de pesquisa de três anos, envolvendo projetos de pesquisa e de desenvolvimento tecnológico, bem como discussões e validações em fóruns com a indústria, que levaram ao seu aperfeiçoamento ao longo de 2014.

Para dar conta da análise desse novo fenômeno, este artigo está estruturado de modo a inicialmente discutir o conceito de manufatura aditiva, as vantagens e desvantagens da tecnologia e suas principais variantes, por meio de revisão bibliográfica sistemática. Em seguida, análise específica leva a proposta de organização das aplicações de manufatura aditiva em sete grandes áreas, de acordo

com sua aplicação e impacto, sendo elas: equipamentos de baixo custo, produção de bens de consumo, produtos voltados a área de saúde, prototipagem industrial, produção de ferramental, *maintenance, repair, and operations* (MRO) e inserção em processos produtivos em série com eventual customização. Ao final, são discutidos os desafios a superar para a difusão da manufatura aditiva a ponto de disputar a aplicação com processos tradicionais, e suas implicações.

2. EVOLUÇÃO DA PESQUISA EM MANUFATURA ADITIVA E ESTADO DA ARTE

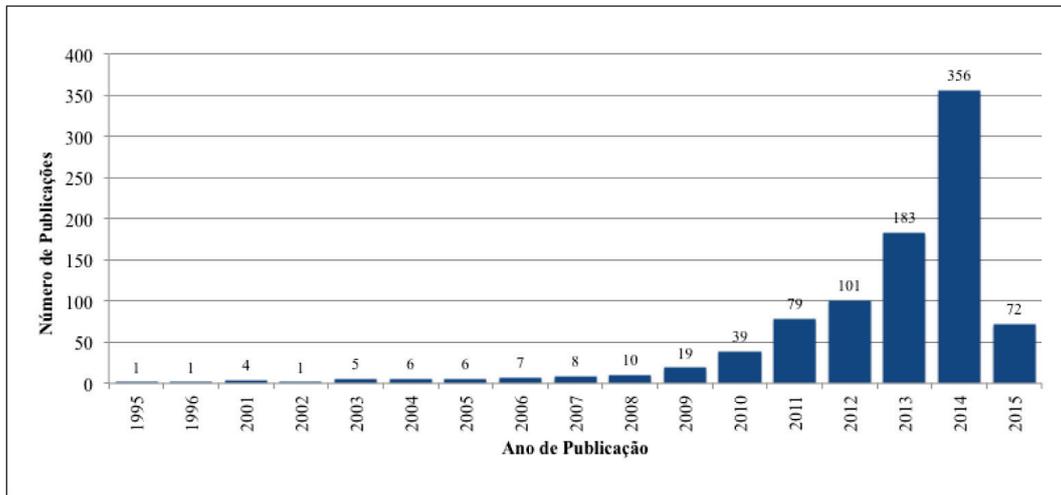
Para compreender a evolução das pesquisas neste novo campo de estudos utilizou-se a revisão bibliográfica sistemática. Uma revisão bibliográfica é sistemática quando é explícita e pode ser reproduzida, gerando os mesmos resultados (FINK, 2005). Este tipo de revisão é importante para definir os limites de uma pesquisa de maneira científica (DANE, 1990), sendo compatível com os objetivos deste artigo, de gerar um *framework* de aplicação.

A partir de bases de dados reconhecidas na academia, foram obtidos os dados de produção científica sobre manufatura aditiva, e em seguida foram aplicados filtros e métodos de análise para construir o histórico e descrição das principais pesquisas sobre o tema (CROWTHER; COOK, 2007, CARTER; EASTON, 2011). É importante ressaltar que a análise sistemática da bibliografia não substitui o estudo aprofundado e qualitativo dos textos (RODRIGUEZ; NAVARRO, 2004). Assim, os textos mais importantes foram analisados em detalhe.

A amostra de artigos foi extraída da base de dados *ISI Web of Science*, pois ela agrega grande bases de dados de periódicos e permite que os resultados da pesquisa sejam exportados em metadados, o que é essencial para a análise realizada. A palavra-chave utilizada para a pesquisa foi “*additive manufacturing*”. Para a realização da pesquisa foi utilizado o filtro de *document type*, que permitiu escolher para os resultados de pesquisa apenas artigos publicados em *journals*. A busca resultou em 898 trabalhos para análise. A partir da análise realizada foi possível identificar o histórico de publicações, a origem e a evolução das pesquisas científicas que envolvem o tema, bem como reconhecer campos de pesquisa emergentes.

O primeiro resultado da análise diz respeito à contemporaneidade das publicações e permite concluir que o interesse no tema é recente e ganha força a cada ano desde 2008. A Figura 1 apresenta o número de publicações sobre manufatura aditiva por ano, de acordo com a seleção de artigos realizada.

Figura 1 - Número de publicações por ano.



Fonte: Elaborado pelos autores.

O aumento do número de publicações nos últimos anos é compatível com o crescente interesse das empresas em aplicar essas tecnologias em seus processos produtivos. Para entender os periódicos que mais se destacaram em publicações sobre o tema, foram identificados aqueles com dez ou mais publicações, e realizado um levantamento do escopo e de suas principais áreas de atuação.

De um total de doze periódicos levantados, aquele com mais publicações, *Rapid Prototyping Journal*, apresenta um total de 85 artigos sobre o tema e está muito à frente dos outros em número de publicações, dada sua especialização em prototipagem rápida, que é a aplicação mais tradicional e antiga de manufatura aditiva. Analisando apenas a partir do segundo periódico mais citado, verifica-se que seis deles enfocam materiais, sendo este um campo relevante de estudos em manufatura aditiva (*Journal of Materials Processing Technology*, *Materials & Design*, *Journal of Materials Research*, *Materials Science and Engineering A – Structural Material Properties Microstructure and Processing*, *Advanced Materials & Processes*, *Acta Materialia*). Três periódicos tratam de estudos sobre manufatura (*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME*), um periódico trata de fabricação utilizando biomateriais (*Biofabrication*), um periódico trata de aplicações de laser (*Journal of Laser Applications*).

Outro indicador importante para a análise exploratória do campo de estudo é o número de citações por artigo. Foram identificados os 13 artigos que tiveram maior influência na pesquisa deste tema, cujo critério de decisão foi definido como um mínimo de 40 citações, e listados aqui em ordem decrescente do número de citações e apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Artigos que obtiveram, no mínimo, 40 citações.

TÍTULO	AUTORES	ANO	TOTAL DE CITAÇÕES	OBJETIVOS	PRINCIPAIS RESULTADOS OU CONCLUSÕES
<i>A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V</i>	Thijs, Lore; Verhaeghe, Frederik; Craeghs, Tom; Van Humbeeck, Jan; Kruth, Jean-Pierre	2010	122	Estudar a microestrutura da peça fabricada por SLM	A direção dos grãos é o fator que mais influencia a resistência
<i>Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability</i>	Dinda, G. P.; Dasgupta, A. K.; Mazumder, J.	2009	78	Fabricação e análise da resistência de peças por DMD	DMD obteve bons resultados: sem fissuras, sem porosidade e sem problemas de ligação
<i>Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting</i>	Mercelis, Peter; Kruth, Jean-Pierre	2006	65	Estudo de estresse residual nas tecnologias SLS e SLM	Estresse residual alto para SLM
<i>Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing</i>	Hu, DM; Kovacevic, R	2003	60	Desenvolver um sistema de controle para máquinas de LBM	Modelo tridimensional de elementos finitos
<i>Modeling of laser cladding with powder injection</i>	Han, L; Liou, FW; Phatak, KM	2004	59	Construir modelo matemático para otimizar tecnologia de fabricação	Melhoria na qualidade da peça produzida com novo modelo
<i>The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V</i>	Kobryn, PA; Semiatin, SL	2001	56	Estudo da microestrutura de peças fabricadas por LAM	Estudo permite uma primeira análise da microestrutura
<i>Direct Writing By Way of Melt Electrospinning</i>	Brown, Toby D.; Dalton, Paul D.; Hutmacher, Dietmar W.	2011	55	Endereçar a lacuna existente entre a solução de electrospinning e processos de manufatura aditiva	O estudo é bem-sucedido em depositar fibras poliméricas derretidas para criar estruturas porosas complexas, dando origem a um novo método de MA

TÍTULO	AUTORES	ANO	TOTAL DE CITAÇÕES	OBJETIVOS	PRINCIPAIS RESULTADOS OU CONCLUSÕES
<i>Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability</i>	Dinda, G. P.; Dasgupta, A. K.; Mazumder, J.	2009	78	Fabricação e análise da resistência de peças por DMD	DMD obteve bons resultados: sem fissuras, sem porosidade e sem problemas de ligação
<i>Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting</i>	Mercelis, Peter; Kruth, Jean-Pierre	2006	65	Estudo de estresse residual nas tecnologias SLS e SLM	Estresse residual alto para SLM
<i>Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing</i>	Hu, DM; Kovacevic, R	2003	60	Desenvolver um sistema de controle para máquinas de LBM	Modelo tridimensional de elementos finitos
<i>Modeling of laser cladding with powder injection</i>	Han, L; Liou, FW; Phatak, KM	2004	59	Construir modelo matemático para otimizar tecnologia de fabricação	Melhoria na qualidade da peça produzida com novo modelo
<i>The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V</i>	Kobryn, PA; Semiatin, SL	2001	56	Estudo da microestrutura de peças fabricadas por LAM	Estudo permite uma primeira análise da microestrutura
<i>Direct Writing By Way of Melt Electrospinning</i>	Brown, Toby D.; Dalton, Paul D.; Hutmacher, Dietmar W.	2011	55	Endereçar a lacuna existente entre a solução de electrospinning e processos de manufatura aditiva	O estudo é bem-sucedido em depositar fibras poliméricas derretidas para criar estruturas porosas complexas, dando origem a um novo método de MA
<i>Towards All-Organic Field-Effect Transistors by Additive Soft Lithography</i>	Serban, Dana Alina; Greco, Pierpaolo; Melinte, Sorin; Vlad, Alexandru; Dutu, Constantin Augustin; Zacchini, Stefano; Iapalucci, Maria Carmelo; Biscarini, Fabio; Cavallini, Massimiliano	2009	50	-	-

TÍTULO	AUTORES	ANO	TOTAL DE CITAÇÕES	OBJETIVOS	PRINCIPAIS RESULTADOS OU CONCLUSÕES
<i>Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays</i>	Murr, L. E.; Gaytan, S. M.; Medina, F.; Lopez, H.; Martinez, E.; Machado, B. I.; Hernandez, D. H.; Martinez, L.; Lopez, M. I.; Wicker, R. B.; Bracke, J.	2010	45	Análise da fabricação de próteses por EBM	Medições das características microestruturais das peças
<i>Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties</i>	Vrancken, Bey; Thijs, Lore; Kruth, Jean-Pierre; Van Humbeeck, Jan	2012	44	Apresentar as propriedades mecânicas e microestruturais do tratamento de calor da liga Ti6Al4V produzida por SLM	Comparações entre SLM e métodos convencionais, além de uma proposta de tratamento ótimo de calor da liga Ti6Al4V
<i>Single track formation in selective laser melting of metal powders</i>	Yadroitsev, I.; Gusarov, A.; Yadroitsava, I.; Smurov, I.	2010	42	Exploração dos efeitos de parâmetros de processamento na formação de single tracks no método SLM	São encontradas correlações negativas entre condutividade térmica e o intervalo de velocidade ótima de escaneamento
<i>Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances</i>	Pinkerton, AJ; Li, L	2004	42	Desenvolvimento e verificação de modelo para deposição de metal por DMD	Modelo consegue balancear massas e energias na fabricação
<i>Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures</i>	Bael, S.V.; Kerckhofs, G.; Moesen, M.; Pyka, G.; Schrooten, J.; Kruth, J. P.	2011	40	Otimização do robustez e controlabilidade da produção de diferentes estruturas porosas de Ti6Al4V usando SLM	Os protocolos demonstrados podem ser aplicados a diferentes estruturas, propriedades e técnicas de MA, além de diferentes materiais. A melhoria na controlabilidade morfológica melhora a controlabilidade mecânica

Fonte: Elaborado pelos autores.

O conteúdo desses 13 artigos mais citados foi analisado e procurou-se entender seus objetivos e as principais conclusões resultantes. A análise do conteúdo dos artigos mais citados permitiu a identificação de quatro temas mais discutidos na área de manufatura aditiva:

1. Tecnologias de manufatura aditiva;
2. Aplicações na indústria;
3. Materiais;
4. Sustentabilidade na manufatura aditiva.

No escopo deste artigo são abordados os dois primeiros temas. As tecnologias de manufatura aditiva são analisadas na seção 3, após a discussão de conceitos fundamentais de manufatura aditiva na seção 2.1 a seguir, que são essenciais para entendimento das tecnologias, e que complementam o entendimento do estado da arte. A análise das aplicações na indústria é objeto da seção 4, que apresenta o *framework* proposto de aplicações da manufatura aditiva.

2.1. Conceitos fundamentais de manufatura aditiva

A norma ASTM (2012) define manufatura aditiva como o “processo de construção de objetos tridimensionais sólidos a partir da deposição de camadas, sendo oposta à manufatura subtrativa”. Gibson et al. (2009) definiram oito etapas necessárias, em geral, para a produção utilizando a manufatura aditiva, também representadas esquematicamente na Figura 2:

- **CAD (*Computer-aided design*):** toda peça a ser produzida por manufatura aditiva deve ter sua geometria definida por um modelo numérico (*software*). Para tanto, pode-se empregar praticamente qualquer *software* profissional de CAD ou *softwares* e equipamentos de engenharia reversa (*reverse engineering*), como scanners.
- **Conversão para STL:** o formato aceito em praticamente todos os equipamentos de manufatura aditiva é o STL (*surface tessellation language*), que é o padrão da indústria no momento.
- **Transferência para a máquina de manufatura aditiva e manipulação do arquivo:** o arquivo representando a peça deve ser transferido para o equipamento em que será produzida. Eventuais manipulações para corrigir o posicionamento, tamanho ou orientação da peça no arquivo podem ser necessárias.

- **Configurar a máquina:** pode ser necessário definir alguns parâmetros na máquina, como espessura das camadas, dentre outros.
- **Produção:** a produção por manufatura aditiva é automatizada, com baixa necessidade de supervisão humana direta; esta serve ocorre basicamente para garantir o suprimento de materiais, a descarga da máquina e para prevenir/atuar em eventuais problemas.
- **Remoção:** após o fim da produção, a peça deve ser retirada da máquina.
- **Pós-processamento:** após a produção, podem ser requeridas atividades adicionais, como a retirada de estruturas de suporte e limpeza. Tratamentos adicionais podem ser necessários para garantir qualidades estéticas à peça, como pintura e tratamentos de superfícies, ou as características físicas desejadas, como resistência e dureza.
- **Aplicação:** a peça está pronta para ser usada.

Figura 2 - Etapas para produção de peça por manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Gibson et al. (2009).

O potencial de melhorias no processo produtivo trazido pela tecnologia de manufatura aditiva aumenta o interesse pelo estudo desse campo (KRUTH; LEU; NAKAGAWA, 1998, LEVY; SCHINDEL; KRUTH, 2003, SREENIVASAN; GOEL; BOURELL, 2010). Dentre os impactos, destacam-se: a produção de peças mais leves e eficientes; a economia de matéria-prima; a substituição de processos produtivos não energeticamente eficientes; a possibilidade de fabricação próxima ao consumidor (LUO et al, 1999; MORROW et al, 2006, BOURELL; LEU; ROSEN, 2009, REEVES, 2008, SERRES, 2011, VAYREA; VIGNATA; VILLENEUEVA, 2012, HUANG; LIU; MOKASDAR, 2013). Dessa forma, a manufatura aditiva já apresenta diversas características que têm tornado cada vez mais comum a sua aplicação, apesar de ainda existirem limitações quanto à qualidade das peças produzidas em comparação com os meios convencionais de produção.

Segundo Berman (2012), a capacidade de produzir peças com *design* complexo, a facilidade de compartilhamento de projetos, a otimização da utilização de material, a produção automatizada e a capacidade de produzir peças funcionais são aspectos nos quais a manufatura aditiva se sobressai. Holmström et al. (2010) acrescentam que a manufatura aditiva torna economicamente viável a personalização do *design* de cada produto fabricado, permite alterações na definição de um lote de peças com maior velocidade e facilita o desenvolvimento de uma cadeia de logística simplificada. Sealy (2012) ressalta que é fundamental que o *designer* ou projetista tenha conhecimento das limitações dos processos produtivos empregados na fabricação do produto, conhecendo as limitações do maquinário empregado e a habilidade de fabricação dos funcionários, para que possa ser mais eficiente no seu projeto.

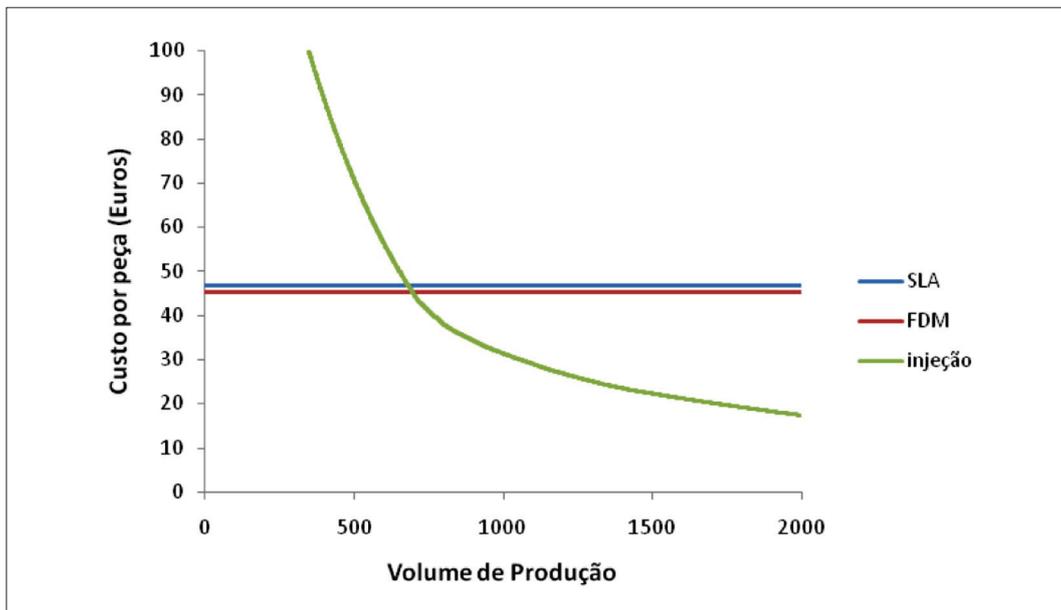
Apesar das vantagens, Berman (2012) afirma que a manufatura aditiva possui como fatores limitantes: a menor precisão dimensional em relação aos métodos convencionais de produção; possuir ainda uma pequena variedade de materiais, cores e acabamentos superficiais disponíveis; e resistência limitada à tensão, ao calor e à umidade elevada. Para Sealy (2012), ainda há dúvidas quanto à integridade estrutural de produtos finais produzidos por manufatura aditiva.

Berman (2012) também ressalta que para produção em massa de produtos, a manufatura aditiva ainda possui equipamentos muito caros, o que, se não for equacionado, coloca em xeque a ideia de ausência de economia de escala: se a máquina envolve investimento significativo, tal investimento precisa ser amortizado por uma produção relativamente alta, ainda que de peças mais diversificadas.

De acordo com Hopkinson e Dickens (2003), os altos custos de equipamentos, manutenção e materiais constituem uma das principais barreiras à utilização da manufatura aditiva. Entretanto, os autores ressaltam que a crescente adoção da tecnologia pela indústria tem levado à redução de custos e ao surgimento de equipamentos menos caros no mercado, graças a economias de escala na produção destes equipamentos e a avanços tecnológicos, e que, com o crescimento do número de fornecedores e conseqüente intensificação da competição, deve levar à redução do preço dos equipamentos.

Os autores ainda avaliaram a viabilidade econômica do emprego da tecnologia para produção de produtos finais em comparação com métodos convencionais de produção. No caso, eles compararam a produção de uma peça plástica pelo processo tradicional via injeção com dois processos (duas tecnologias distintas) de manufatura aditiva - estereolitografia (*stereolithography* - SLA) e de modelagem por deposição de material fundido (*fused deposition modelling* - FDM). Assim, os autores concluíram que para volumes de produção até 700 unidades, no caso específico analisado, seria viável economicamente a produção por manufatura aditiva, apesar de ainda serem necessários estudos e avanços tecnológicos para garantir que as peças produzidas por esta tecnologia apresentem as mesmas qualidades físicas das peças produzidas pelos métodos convencionais. Ressaltaram a característica da manufatura aditiva apresentar praticamente nenhuma economia de escala na produção da peça em si, apesar de que em etapas de pós processamentos ou na compra de matéria prima pode-se encontrar menores custos por unidade conforme o aumento do tamanho do lote. Na injeção de plástico é necessário primeiro fabricar um caro molde para a produção, cujo valor será rateado por todas as peças fabricadas, enquanto que na manufatura aditiva, para cada nova peça a ser fabricada, adiciona-se praticamente apenas os custos de material. A Figura 3 apresenta uma comparação de custos por unidade para as tecnologias de SLA, FDM e injeção, conforme estudo apresentado por Hopkinson e Dickens (2003).

Figura 3 - Comparação dos custos por unidade para diferentes volumes de produção entre estereolitografia (SLA), modelagem por deposição de material fundido (FDM) e injeção de plástico.



Fonte: Adaptado de Hopkinson e Dickens (2003).

Uma vez compreendidos os conceitos fundamentais sobre manufatura aditiva e entendidas as limitações de conhecimento que ainda permeiam este tema, a seção seguinte apresenta as tecnologias de manufatura aditiva e suas principais características.

TECNOLOGIAS E MATERIAIS

Recentemente, verifica-se o lançamento no mercado de diversas tecnologias de manufatura aditiva (GOLDSBERRY, 2009). Diferentes autores classificam estas tecnologias de maneiras distintas (para um exemplo, ver norma ASTM, 2012). Neste trabalho, é usada a classificação proposta por Guo e Leu (2013), que separa as tecnologias de manufatura aditiva em quatro categorias, de acordo com o tipo de matéria prima utilizada na fabricação: (i) líquido; (ii) filamento/pasta; (iii) pó; e (iv) placa sólida. Foram selecionadas para estudo as tecnologias encontradas nos trabalhos avaliados na revisão bibliográfica sistemática. A Tabela 2 resume as principais características das tecnologias estudadas.

Tabela 2 - Características dos processos de manufatura aditiva.

Matéria-prima	Processo	Material	Princípio	Aplicações
Líquido	<i>Stereolithography</i> (SLA)	Polímeros fotossensíveis	Produção de peças de polímero a partir da solidificação destes com um laser	Protótipos, moldes
	<i>Multi-jet Modeling</i> (MJM)	Acrílico fotossensível, plástico e cera	Produção de peças a partir da solidificação do material depositado por flash de uma iluminação ultravioleta (UV)	Protótipos, moldes
	<i>Rapid Freezing Prototyping</i> (RFP)	Água	Produção de peças a partir do congelamento das gotículas de água depositadas	Protótipos, moldes
Filamento/ Pasta	Modelação por extrusão de plástico (FDM)	Termoplásticos	Produção de peças por extrusão do plástico por bico extrusor em uma base	Protótipos, moldes
	<i>Robocasting</i>	Pasta cerâmica	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica	Objetos cerâmicos
	<i>Freeze-form Extrusion Fabrication</i> (FEF)	Pasta cerâmica e água	Produção de peças com a extrusão de pasta cerâmica aquosa	Objetos cerâmicos
Pó	Sinterização seletiva a laser (SLS)	<i>Alumide; Carbon Fibre; PA 1101; PA2200/2201; PA 2221; PA2202; PA 2210; PA3200; PAEK; Polystyrene</i>	Produção de peças por meio do processo de sinterização de camadas de pó	Protótipos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; peças especiais para indústria; moldes
	<i>Selective Laser Melting</i> (SLM)	<i>Stainless steel 316L e 17-4PH; H13 tool steel; Aluminium Al-Si-12 e Al-Si-10; Titanium CP, Ti-6Al-4V e Ti-4Al-7Nb; Cobalt-chrome ASTM75; Inconel 718 e 625</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um laser	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; trocadores calor; moldes; peças especiais para indústria
	<i>Electron Beam Melting</i> (EBM)	<i>Cobalt-chrome ASTM F75; Titanium Ti-6Al-4V, Grade 2;</i>	Produção de peças de metal por meio da fusão de camadas de pó de metal por um arco elétrico	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes automotivas
Placa sólida	<i>Laser Metal Deposition</i> (LMD)/ <i>Laser Engineered Net Shaping</i> (LENS)/ <i>Direct Metal Deposition</i> (DMD)	<i>Aluminium Al-Si-10Mg; Cobalt-chrome MP1 e SP2; Maraging Steel; Inconel 718 e 625; Stainless steel 17-4PH e 15-5PH; Titanium Ti-6Al-4V</i>	Produção de peças através da fusão completa de pó de metal	Implantes médicos; partes aeronáuticas; partes motores automotivos; trocadores calor; moldes; peças especiais para indústria
	Impressão Tridimensional (3DP)	Polímeros, metais, cerâmica e outros pós	Produção de peças pela deposição de pó sobre uma base, que é unido seletivamente pela injeção de aglutinante	Protótipos, moldes, ferramental para indústria
	Manufatura de objeto em lâminas (LOM)	Papel, plástico, metal	Produção de peças pela união de uma camada de material laminado a uma série de outras lâminas conformadas	Protótipos e moldes

Fonte: Elaborado pelos autores.

É importante ressaltar que podem existir outras tecnologias que não foram mencionadas nas publicações avaliadas e, portanto, não serão consideradas neste trabalho. Na sequência é apresentada uma breve descrição das três principais tecnologias estudadas: estereolitografia (SLA), sinterização seletiva a laser (*selective laser sintering* - SLS) e modelagem por deposição de material fundido (FDM).

A estereolitografia (SLA) é considerada a tecnologia que iniciou a revolução da prototipagem rápida, com a primeira patente emitida em 1986 para Charles W. Hull que, no mesmo ano, fundou a empresa 3D Systems e lançou o primeiro equipamento no mercado em 1988 (CHUA; LEONG; LIM, 2010). Trata-se da produção de um objeto tridimensional por meio da foto-polimerização de uma resina líquida sobre uma plataforma pela incidência de um feixe de laser ultravioleta direcionado por um sistema de espelhos galvanométricos, causando, assim, o endurecimento da resina e formando uma camada do produto final. Após a formação desta camada, a plataforma é abaixada em uma cuba preenchida com resina e uma nova camada de resina líquida surge sobre a anterior e reinicia-se o processo, até a formação final do objeto. Devido à alta viscosidade da resina, ativa-se um subsistema para nivelar a resina líquida sobre a plataforma, deixando-a plana. Após o processo de fabricação na máquina de SLA, é retirado o excesso de resina da peça com um solvente, e insere-se a mesma em fornos ultravioleta para aumentar o grau de cura da peça (LAN et al., 1997). Ahrens et al. (2007) ressaltam que, dependendo da geometria do objeto a ser criado na SLA, suportes são criados pela máquina para dar sustentação ao objeto que está sendo produzido, os quais devem ser retirados após a produção na máquina.

A sinterização seletiva a laser (SLS) foi desenvolvida com o objetivo de permitir a utilização de diferentes materiais, como polímeros, cerâmicas e metais, na manufatura aditiva, sendo primeiramente comercializada em um equipamento na década de 90 (CHUA; LEONG; LIM, 2010). Na SLS utiliza-se um feixe de laser, direcionado por um sistema de espelhos, para a sinterização seletiva do material em pó sobre uma plataforma, formando as camadas do objeto tridimensional desejado. Após a formação da camada do produto, a plataforma é abaixada, uma nova camada de pó é adicionada e o processo se repete até a formação final do produto. Durante o processo, a plataforma que apoia o produto é aquecida previamente a uma temperatura próxima da temperatura de sinterização do material, facilitando a sinterização pelo feixe de laser e diminuindo o gradiente de temperatura entre o material sinterizado e não-sinterizado (HOPKINSON; HAGUE; DICKENS, 2006). Chua, Leong e Lim (2010) consideram

que em geral as peças produzidas por esta tecnologia são sólidas o suficiente para não exigirem diversos processos de pós-cura e que a vantagem da tecnologia é a grande disponibilidade de materiais, uma vez que plásticos, aços e outros metais em forma de pó podem ser sinterizados com esta tecnologia. Ahrens et al. (2007) citam como desvantagens do processo o preço elevado do equipamento e o consumo elevado de energia na sinterização de metais.

Na modelagem por deposição de material fundido (FDM), filamentos de uma resina termoplástica são extrudados, a altas temperaturas, sendo depositados sobre uma plataforma de construção. O bico extrusor está ligado a um cabeçote que se movimenta no plano X-Y, paralelo ao plano da plataforma, distribuindo o material de acordo com a geometria da camada em construção. Ao entrar em contato com a plataforma, que se encontra em temperatura inferior ao material extrudado, o filamento depositado é rapidamente endurecido, formando uma camada da peça a ser produzida. Ao término da deposição da camada, a plataforma é abaixada na direção do eixo Z, reiniciando-se o processo de deposição e formando uma nova camada sobre a anterior. Este processo se repete sucessivamente até a formação final do objeto (UPCRAFT; FLETCHER, 2003). Segundo Ahrens et al. (2007), muitas vezes, dependendo da geometria da peça a ser produzida, torna-se necessário a produção de um suporte para apoiá-la estruturalmente, como na estereolitografia. Para Hopkinson, Hague e Diskens (2006), o processo possui velocidade limitada pelo fato de a cabeça extrusora precisar percorrer toda a área de cada camada a ser construída. Entretanto, ressaltam que os equipamentos de FDM são fáceis de serem instalados, podendo ser utilizados tanto em ambientes de escritórios quanto em fábricas. Para Kai et al. (2003) apud Ahrens et al. (2007), com FDM é possível criar peças funcionais que apresentam 85% da resistência de peças produzida pelo processo de injeção com o mesmo material. A lista de materiais disponíveis para esta tecnologia inclui ceras, poliésteres, ABS (acrilonitrila butadieno estireno), policarbonatos (PC) e polifenilsulfona (PPSF) (STRATASYS, 2014).

As diversas tecnologias de manufatura aditiva ganharam espaço nos últimos anos com o crescimento da fabricação de protótipos e o crescimento de produção de peças finais para as indústrias aeronáutica e aeroespacial (THOMAS et al., 1996; MARTINA et al., 2012, METZGER; MUSCATELLO; MUELLER, 2013), automotiva (SONG et al., 2002), biomédica (SACHLOS; CZERNUSZKA, 2003, GIANNATSI; DEDOUSSIS, 2009) e outros campos (e.g. arquitetura e *design*), conforme discutido na próxima seção.

PROPOSTA DE ORGANIZAÇÃO DAS APLICAÇÕES DA MANUFATURA ADITIVA

O *framework* de aplicações de manufatura aditiva apresentado neste artigo é resultado de esforço de pesquisa de três anos, envolvendo projetos de pesquisa, um projeto de desenvolvimento tecnológico realizado em conjunto com pequena empresa de máquinas de manufatura aditiva no âmbito do programa PIPE (Pesquisa Inovativa em Pequenas Empresas) da FAPESP, um projeto de extensão na área de políticas públicas realizado para órgão de inteligência ligado à administração federal, uma orientação de mestrado e diversas experiências de aplicação de manufatura aditiva no ensino de engenharia.

O *framework* foi construído a partir da identificação de áreas de aplicação obtidas da síntese da revisão da bibliografia, de forma dedutiva. Ao mesmo tempo, de forma indutiva, resultados empíricos decorrentes dos vários projetos de pesquisa e desenvolvimento foram empregados para a caracterização das áreas de aplicação identificadas. Por exemplo, o projeto de desenvolvimento realizado com uma pequena empresa contribuiu com a caracterização das aplicações de baixo custo da impressão 3D. O projeto de políticas públicas, que foi focado em aplicações da manufatura aditiva na área de saúde, contribuiu com a caracterização desse tipo aplicação. Projeto de pesquisa específico tratou da inserção da manufatura aditiva em produtos finais em série, explorando essencialmente as questões de custo e de qualidade das peças, contribuindo para a caracterização dessa área de aplicação.

Ao longo de 2014, o *framework* de aplicação foi discutido em seis fóruns com pessoas de empresas e acadêmicos, realizadas nos seguintes locais e eventos: Instituto de Estudos Avançados (IEA) da Universidade de São Paulo (USP), Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ), Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças), Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade (FEA) da USP, Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), Sociedade dos Engenheiros Automotivos (SAE Brasil) Seção Campinas. As avaliações obtidas nesses encontros contribuíram para o aprimoramento e detalhamento sucessivo do *framework* de forma iterativa, até a estabilização da sua proposta.

Assim, as sete principais áreas de aplicação da manufatura aditiva são:

- Equipamentos de baixo custo – aplicação *low end* da manufatura aditiva;
- Produção de bens de consumo;
- Produtos voltados à área de saúde;
- Prototipagem industrial;
- *Maintenance, repair and operations* (MRO);
- Produção de ferramental
- Inserção em processos produtivos em série com eventual customização.

Essas sete áreas são classificadas de acordo com o impacto direto ao cliente ou à indústria, e com o impacto no desenvolvimento do produto ou na produção do mesmo. O resultado desta categorização é apresentado na matriz da Figura 4.

Figura 4 - *Framework* de aplicações da manufatura aditiva.

	Impacto no Desenvolvimento de Produto	Impacto na produção
Voltado para a indústria	4. Prototipagem industrial	5. MRO 6. Produção de ferramental 7. Inserção em processos produtivos em série – com eventual customização
Voltado para o consumidor	1. <i>Low end</i>	2. Bens de consumo “impressos” 3. Produtos de saúde

Fonte: Elaborado pelos autores.

Existem diferentes características na finalidade, modelo econômico, logística empregada e tecnologias utilizadas em cada uma das aplicações de manufatura aditiva. Por exemplo, por mais que o conceito de produção seja o mesmo, há diferenças claras entre a produção de um brinquedo de plástico nos lares dos consumidores por um equipamento de baixo custo e a produção de peças de alta qualidade para setores industriais seletos em um equipamento industrial sofisticado. As características específicas de cada aplicação são exploradas nas seções a seguir.

4.1. Equipamentos de baixo custo

Nos últimos anos surgiram diversos equipamentos de manufatura aditiva de baixo custo no mercado, buscando levar essa tecnologia para pequenas empresas e para os consumidores em geral. Vislumbrou-se um potencial futuro para a manufatura aditiva em que a tecnologia poderia ter a mesma penetração no mercado do que as impressoras de papel convencionais. São equipamentos pequenos o suficiente para caberem em pequenos escritórios e em lares de consumidores, com custos acessíveis e interface simples de operar pelos usuários. Enquanto que em 2001 os equipamentos mais acessíveis custavam a partir de US\$45.000, em 2011 já custavam a partir de mil dólares (MOTA, 2011).

O processo começou em 2004 com o surgimento do projeto RepRap, idealizado por Adrian Bowyer, que buscou o desenvolvimento de um equipamento de *hardware* livre, que pudesse ser facilmente copiado e que fosse capaz de produzir parte de suas próprias peças (BRUIJN, 2010). A tendência de desenvolvimento de equipamentos de baixo custo se acentuou a partir de 2009 com o fim das patentes sobre a tecnologia de modelagem por deposição de material fundido (FDM), levando tanto grandes empresas do setor como *startups* a lançarem suas máquinas de baixo custo no mercado (MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE, 2013).

O fato de haver equipamentos de baixo custo disponíveis pode transformar a maneira como produtos podem ser desenvolvidos e produzidos. Para Mota (2011), o surgimento de programas CAD com interfaces mais simples, aliado a instrumentos *online* de compartilhamento de arquivos CAD e equipamentos de manufatura aditiva de baixo custo, pode desencadear a descentralização da produção, na medida em que pode-se ter um número cada vez maior de pequenas empresas e de indivíduos com conhecimento e instrumentos para fabricação

de objetos com finalidade artística, pessoal ou comercial. Tal cenário possui limitações. Os conhecimentos para se projetar uma peça ou para traduzir um projeto em um modelo numérico são especializados e dependem de formação técnica. Ao mesmo tempo, equipamentos de baixo custo ainda não são capazes de atingir todos os atributos necessários para peças finais como, por exemplo, acabamento superficial e resistência mecânica.

De qualquer maneira, um conjunto de empresas, no Brasil e no exterior, dirige sua estratégia de produção de equipamentos de manufatura aditiva para o mercado considerado *low end*. Atualmente, esses equipamentos vêm sendo adotados de forma crescente no ensino e na formação de profissionais capacitados em manufatura aditiva. Também é crescente a adoção em escritórios e pequenas empresas para a produção de protótipos simples e de maquetes.

4.2. Bens de consumo “impressos”

A manufatura aditiva possui impactos significativos também na produção de bens de consumo, como objetos de decoração, objetos domésticos, bijuterias, acessórios, brinquedos, dentre outros.

Para Geraedts, Verlinden e Stellingwerff (2012), a partir do final dos anos 2000, o surgimento de ferramentas na internet que permitem o armazenamento, a troca e a venda de *designs* 3D, impulsionaram a popularização da manufatura aditiva. Algumas empresas oferecem hoje serviços de manufatura aditiva de peças sob demanda, bastando ao consumidor enviar o arquivo do objeto que deseja, recebendo o mesmo, em sua casa, alguns dias depois. (MOTA, 2011).

Nesse sentido, nota-se o surgimento e o crescimento de empresas especializadas na produção de bens de consumo fabricados empregando-se essencialmente a manufatura aditiva. Um exemplo de empresa com esse posicionamento é a Shapeways, uma *spin-off* da Philips Electronics, que produz itens sob demanda utilizando a tecnologia de manufatura aditiva conforme *designs* originais disponíveis em seu sítio na internet. Os projetos podem ser elaborados por qualquer pessoa e oferecidos no sítio da empresa. Consumidores no mundo todo podem comprar produtos. Não há lote mínimo, de forma que as encomendas podem ser unitárias. A empresa é especializada na produção sob demanda em fábricas localizadas nos Estados Unidos e na Holanda. A partir da produção, o pedido é enviado para o cliente final.

A estratégia desse tipo de serviço emergente é ter ampla captação de projetos 3D de qualidade e ampla distribuição (captação de pedidos), possibilitando concentrar a fabricação com manufatura aditiva, permitindo dessa forma aumento do nível de utilização dos equipamentos e acúmulo de *know how* como, por exemplo, na utilização de diferentes materiais.

4.3. Produtos de saúde

Pode-se destacar a área médica como uma das áreas de aplicação de maior impacto atual da manufatura aditiva. A facilidade de customizar e alterar produtos, a capacidade de produção de objetos com geometria complexa e a disponibilidade de materiais biocompatíveis têm levado à crescente aplicação e a resultados de sucesso de aplicação da tecnologia na área médica. Além disso, a manufatura aditiva pode se mostrar economicamente competitiva na produção de pequenos lotes de produtos em comparação com métodos convencionais, tornando economicamente viável a produção de produtos customizados.

Dentre as áreas de destaque estão os ferramentais de auxílio a cirurgias, ferramentas médicas, implantes ortopédicos, próteses, dentre outras (WEBSTER, 2013). Para Campbell, Bourell e Gibson (2012) as aplicações são inúmeras, pois utilizando-se imagens médicas tridimensionais e manufatura aditiva, diversos aparelhos e tratamentos podem ser personalizados segundo as necessidades fisiológicas de cada paciente. Os autores acreditam que no futuro ainda se poderá utilizar a tecnologia de manufatura aditiva para produzir tecidos do corpo humano para transplante, com a impressão, camada por camada, de células.

Czajkiewicz (2006) ressalta o uso da tecnologia para produção de aparelhos de auxílio de audição personalizados. Sanghera et al. (2001) relatam o uso da manufatura aditiva para produção de modelos médicos para planejamento de operações, permitindo aos médicos analisarem tridimensionalmente a área a ser operada de cada paciente e treinarem com um modelo similar à realidade, desfazendo dúvidas que imagens médicas não puderam esclarecer. Segundo Gibson et al. (2006), muitas cirurgias tornaram-se viáveis graças à existência de moldes médicos criados por manufatura aditiva para planejamento das operações. Segundo Ahrens et al. (2007), os arquivos 3D para produção destes modelos são obtidos por meio da manipulação de imagens de tomografias e ressonância magnética por *softwares* específicos. Um exemplo desse tipo de *software*

é o InVesalius, desenvolvido no Brasil pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CTI).

Chua, Leong e Lim (2010) relatam casos de sucesso do uso da manufatura aditiva em transplantes e próteses. Os autores citam, por exemplo, o caso da substituição de próteses de quadril e outras operações similares que costumavam ser feitas com peças de dimensões padronizadas limitadas, não atendendo às necessidades de pacientes que não se enquadravam nas dimensões estipuladas pelos fabricantes, tornando as operações mais complexas e caras. A manufatura aditiva torna economicamente acessível a obtenção de próteses customizadas que atendam às necessidades de tamanho de cada paciente. Segundo os autores, existem ainda diversas outras aplicações, como auxílio na produção de instrumentos médicos e na produção de máscaras para pacientes que sofreram graves queimaduras no rosto, pois o processo de produção é mais agradável ao paciente pela utilização de *scanners* ópticos e equipamento de manufatura aditiva, em detrimento do tradicional processo que envolve cobrir o rosto do paciente com plástico para moldar uma máscara.

A aplicação em saúde constitui, dessa forma, uma área pioneira de aplicações comerciais e práticas frequentes, como a utilização de manufatura aditiva em planejamento cirúrgico e na produção de próteses dentárias. Ao mesmo tempo, esse campo apresenta importante fronteira de pesquisa em manufatura aditiva, como a impressão de materiais biocompatíveis e a viabilização da produção individualizada de próteses e de órteses.

4.4. Prototipagem industrial

A prototipagem está relacionada à manufatura aditiva desde o surgimento dessa tecnologia, sendo sua principal aplicação inicial, que mantém importância até hoje. Exemplo disso é o fato de até poucos anos atrás a tecnologia ser conhecida pelo nome de prototipagem rápida (*rapid prototyping*) (CAMPBELL; BOURELL; GIBSON, 2012).

A manufatura aditiva é ideal para prototipagem por possibilitar custos menores comparativamente aos métodos convencionais para produção de lotes pequenos ou unitários, como no caso de protótipos, por permitir rápida e fácil alteração no produto e por apresentar baixo tempo de produção.

Segundo Upcraft e Fletcher (2003), a manufatura aditiva pode ser utilizada para prototipagem de modelos conceituais de maneira mais rápida e barata que métodos convencionais. Permite, portanto, que equipes de projeto possam avaliar e testar o produto em seu estágio inicial de desenvolvimento e, assim, fazer alterações rápidas e pouco custosas, se necessário. Com esses protótipos, pode-se analisar a reação que o produto causará nos consumidores, bem como servir para melhor planejamento de como será a produção do mesmo.

Chuck e Thomson (1998) ressaltam o uso da prototipagem rápida para testes de modelos em túneis de vento na indústria aeroespacial. Chua, Leong e Lim (2010) identificam cinco utilidades dos protótipos produzidos pela tecnologia:

- **Experimentação e aprendizado:** eventuais dúvidas que surgirem durante o desenvolvimento do produto podem ser esclarecidas.
- **Teste e validação:** principalmente em etapas iniciais do desenvolvimento do produto pode ser desejável comparar e testar diferentes mecanismos do produto a fim de verificar qual melhor atende as necessidades do projeto.
- **Comunicação e interação:** permite a demonstração de conceitos e funcionamento do produto para gerentes e clientes.
- **Síntese e integração:** permite juntar diversas peças para avaliar se funcionarão em conjunto como planejado.
- **Marcadores de cronograma:** funcionam como auxílio no cumprimento de cronograma de desenvolvimento do produto, servindo como marcadores de fim de cada etapa. Materializam os resultados obtidos em cada etapa e servem para avaliação dos gerentes das empresas para continuar ou interromper o projeto.

Apesar da fabricação de protótipos ser uma área de aplicação tradicional da manufatura aditiva, especialmente nos setores aeronáutico e automotivo, que geralmente possuem engenharia de produtos mais sofisticada, a disseminação da tecnologia e o crescimento da sua adoção com maior número de máquinas disponíveis tem levado ao aumento do seu emprego para obtenção de protótipos em outros setores e por empresas menores, com potencial impacto positivo nos ciclos de inovação dessas empresas.

4.5. MAINTENANCE, REPAIR AND OPERATIONS (MRO)

A manutenção, reparo e operação (maintenance, repair, and operations – MRO) tem grande importância em diversos setores da indústria. No setor aeroespacial, por exemplo, essa atividade é vista como um grande desafio na medida em que é fundamental manter aeronaves em funcionamento o maior tempo possível para que possam trazer retornos para as empresas aéreas. Assim, qualquer tempo que a aeronave permanecer em solo aguardando reparo significará perdas para a companhia aérea e, por conseguinte, para o fabricante da aeronave, que vê seus produtos perderem competitividade. Segundo a consultoria TEAMSAI (2013), existem mais de 22 mil aeronaves em operação no mundo, em um mercado de MRO estimado em 52 bilhões de dólares. Isso significa altos custos com estoque de peças sobressalentes e ferramental para reparo das aeronaves. O MRO também é particularmente importante em outros setores, especialmente naqueles intensivos em capital e que utilizam equipamentos complexos e com alta variedade de itens. É o caso, por exemplo, de máquinas e equipamentos e do setor de energia.

A manufatura aditiva, ao permitir a produção de peças customizadas, em lotes unitários, rapidamente e de forma distribuída no mundo, até mesmo localmente, pode ajudar a reduzir os estoques de componentes que são hoje necessários para manter operações complexas. Seria possível tanto produzir a peça desejada, quanto reparar peças e ferramentas desgastadas por meio da recomposição, camada por camada, do material. Assim, a vida útil da peça ou ferramenta pode ser maximizada, custos de operações podem ser reduzidos, e o nível de prontidão de equipamentos, como aviões, pode ser aumentado (OPTOMECH, 2006).

Khajavi, Partanen e Holmström (2014) analisaram a produção de peças sobressalentes para o caça F/A-18E/F *Super Hornet Fighter* por manufatura aditiva, comparando a produção concentrada em uma única fábrica e a produção dividida em diversos centros, tanto no presente, quanto em um cenário futuro no qual haveria redução de custos dos equipamentos e aperfeiçoamento da tecnologia. Concluem que a produção centralizada ainda é mais barata que a produção em cada local de armazenamento das aeronaves devido, principalmente, aos altos custos dos equipamentos de manufatura aditiva. Entretanto, ressaltam que, com a tendência de redução de custos de aquisição dos equipamentos de manufatura aditiva, a produção distribuída poderá ser economicamente vantajosa em relação à produção centralizada.

Para Holmström et al. (2010), a produção de peças por manufatura aditiva de maneira distribuída seria preferencial em mercados nos quais o tempo de resposta é fator importante e exista demanda de peças para justificar a aquisição de equipamentos para as diversas regiões de produção, reduzindo tempos de entrega e a necessidade de estoque de segurança.

4.6. Produção de ferramental

A manufatura aditiva tem sido empregada de forma crescente para a produção de ferramentais específicos. Destaca-se a produção de moldes de injeção, que podem ter canais de resfriamento otimizados dada a produção do molde camada por camada, permitindo a definição de geometrias mais complexas para o resfriamento. Destaca-se também a produção de moldes de fundição, por deposição de camada por camada do respectivo molde.

O processo de produção de moldes é definido por alguns autores como ferramental rápido (*rapid tooling*), havendo diversos processos para produção do ferramental que utilizam diretamente ou indiretamente a manufatura aditiva (AHRENS et al., 2007). Uma relação de processos de ferramental rápido é apresentada na Tabela 3 (CHUA; LEONG; LIM, 2007)

Tabela 3 - Principais processos de ferramental rápido.

PROCESSOS INDIRETOS	PROCESSOS DIRETOS
Moldes de borracha silicone (RTV – <i>silicone rubber molds</i>)	Moldes poliméricos por SL
Moldes de epóxi com carga de alumínio por vazamento (<i>aluminum filled epoxy molds</i>)	Moldes metálicos por sinterização seletiva a laser (SLS) – <i>RapidTool</i> (DTM-Corp.)
Moldes por pulverização metálica	Moldes metálicos por sinterização a laser e equipamentos EOS (DMLS) – <i>DirectTool</i>
Moldes metálicos por eletrodeposição	Moldes metálicos por impressão tridimensional (3DP) – <i>ProMetal</i>
Moldes metálicos por sinterização a partir de modelos de estereolitografia	Insertos metálicos pelo processo de fabricação da forma final a laser (LENS)

Fonte: Adaptado de Chua, Leong e Lim (2007).

4.7. Inserção em processos produtivos em série com eventual customização

Com o aprimoramento da tecnologia, permitindo a produção de produtos mais resistentes, com melhor acabamento superficial e em maior variedade de materiais, especialmente com o emprego de ligas metálicas, cada vez mais se incorpora a tecnologia de manufatura aditiva a processos produtivos da indústria. Segundo a revista *The Economist* (2013) a manufatura aditiva pode tanto competir quanto complementar os métodos convencionais de produção. Assim, espera-se que tecnologia venha a possuir um papel na produção de produtos pela indústria, sendo complementada por pós processamentos e até mesmo usinagem.

A General Eletric é considerada das empresas mais avançadas na adoção de manufatura aditiva para peças críticas de produtos finais. A empresa criou um centro de estudo da tecnologia em Ohio, nos Estados Unidos e possui hoje mais de 300 equipamentos de manufatura aditiva. O primeiro item que será produzido primordialmente por manufatura aditiva em grande volume para produtos finais será uma nova geração de injetores de combustível para o modelo de turbina aeronáutica LEAP. Nesse componente, a adoção da manufatura aditiva possibilitou otimização da geometria que gerou redução de peso de 25% em relação aos modelos atuais feitos pela junção de cerca de 20 componentes. Projeta-se a produção de 75 mil injetores no período de três anos a partir de 2015. A empresa avalia em aproximadamente 450 kg o potencial de redução de peso em uma única aeronave devido geometrias complexas e otimizadas que a manufatura aditiva permite construir (GENERAL ELETRIC, 2014).

Guo e Leu (2013) apontam aplicações da manufatura aditiva na indústria automobilística de luxo, mercado de baixo volume e que utiliza estruturas complexas de ligas leves, como para a produção de escapamentos de motores e componentes do câmbio e do sistema de freios. Também mencionam aplicações na indústria aeroespacial para produção de peças para satélites, helicópteros e turbinas, como *blades* de turbina, suportes de compressores de turbinas e dutos.

5. CONCLUSÃO

Manufatura aditiva é tema dos mais relevantes, e merece muita pesquisa. Nosso intento no presente texto foi de elucidar o estado-da-arte da tecnologia, suas potencialidades e limitações. Tal se faz necessário para organizar o campo de estudo, e incentivar pesquisadores a nele se imiscuírem. Há questões abertas extremamente relevantes, desde a característica mecânica das peças produzidas (resistência a tensões, tração, cisalhamento etc.) até a possibilidade de produção em lotes extremamente baixos, de maneira descentralizada. Todos esses aspectos precisam ser comprovados por muitas pesquisas, mas é evidente o potencial que a manufatura aditiva possui e as transformações radicais na cadeia de desenvolvimento de produto e produção que seu desenvolvimento e difusão poderão acarretar. Ela carrega a promessa de que as empresas desenvolvam peças ou produtos para atender as necessidades únicas de cada cliente de uma maneira rápida e economicamente viável. Apenas para recuperar o potencial de impacto, o McKinsey Global Institute (2013) coloca a manufatura aditiva como uma das 12 tecnologias disruptivas que mais poderiam impactar a economia global até 2025, ressaltando que tem havido um aumento do desempenho dos equipamentos em conjunto com aumento da variedade de materiais e redução de custos, o que poderia levar ao ponto da rápida adoção da tecnologia por consumidores e intensificação da utilização da tecnologia nas indústrias.

Na indústria de equipamentos de baixo custo, espera-se o contínuo aprimoramento dos equipamentos e crescente adoção dos produtos. Trata-se de segmento que tem atraído a atenção do público geral e cada vez mais novos equipamentos e tecnologias têm sido introduzidos. Algumas empresas brasileiras disputam o mercado doméstico, mas a concorrência internacional tem se intensificado. Há dúvidas também quanto às mudanças que o fim de certas patentes de sinterização seletiva a laser (SLS) no ano de 2014 acarretará no mercado, tanto de equipamentos sofisticados quanto de baixo custo. Além disso, tem havido uma multiplicação dos espaços disponíveis para a manufatura aditiva, seja em universidades, laboratórios ao estilo de ferramentarias abertas ao público, e até mesmo em lojas de varejo, o que vem ocorrendo também no Brasil.

A manufatura aditiva está evoluindo rapidamente e de maneira diferente em cada um dos segmentos apontados nesta pesquisa. A redução de custos e aprimoramento da tecnologia tem resultado em novas aplicações e crescente adoção deste tipo de tecnologia. Assim, a manufatura aditiva deve ser carac-

terizada e estudada em maior profundidade. A tipologia proposta, com os sete segmentos identificados neste artigo, auxilia na organização do debate, uma vez que cada área possui requisitos e mercados distintos, configurando-se como possibilidades de pesquisas futura, seja em termos de mercado, tecnológicos ou de impacto econômico, organizacional e de gestão nas empresas adotantes.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP, CAPES e CNPq pelo financiamento de projetos relacionados com este trabalho.

REFERÊNCIAS

AHRENS, C. H.; FERREIRA, C. B.; PETRUSH, G.; CARVALHO, J. D.; SANTOS, J. R. L. D.; SILVA, J. V. L. D.; VOLPATO, N. **Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações**. 1 ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2007. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies. **ASTM International**, 2012.

BAEL, S. V.; KERCKHOFS, G.; MOESEN, M; PYKA, G.; SCHROOTEN, J.; KRUTH, J. P. Micro-CT-based improvement of geometrical and mechanical controllability of selective laser melted Ti6Al4V porous structures. **Materials Science and Engineering**, v. 528, p. 7423–7431, 2011.

BERMAN, B. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business Horizons**, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012.

BOURELL, D.; LEU, M.; ROSEN, D. Identifying the Future of Freeform Processing. **Roadmap for Additive Manufacturing**. Austin: The University of Texas, 2009.

BROWN, T. D.; DALTON, P. D.; HUTMACHER, D. W. Direct Writing By Way of Melt Electrospinning. **Advanced Materials**, v. 23, p. 5651-5657, 2011.

BRUIJN, E. **On the viability of the open source development model for the design of physical objects: Lessons learned from the RepRap project**. 2010. 58 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - University of Tilburg, Holanda, 2010.

CAMPBELL, I.; BOURELL, D.; GIBSON, I. Additive manufacturing: rapid pro-

- tototyping comes of age. **Rapid Prototyping Journal**, v. 18, n. 4, p. 255-258. 2012.
- CARTER, C.; EASTON, P. L. Sustainable supply chain management: evolution and future directions. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 41, p. 46-62, 2011.
- CHUA, C. K.; LEONG, K. F.; LIM, C. S. **Rapid Prototyping: Principles and Applications in Manufacturing**. Singapura: World Scientific, 2010.
- CHUCK, R. N.; THOMSON, V. J. A comparison of rapid prototyping techniques used for wind tunnel model fabrication. **Rapid Prototyping Journal**, v. 4, n. 4, p.185-196, 1998.
- CROWTHER, M.; COOK, D. Trials and tribulations of systematic reviews and meta-analysis. **Hematology**, p. 493-507, 2007.
- CZAJKIEWICZ, Z. J. Application of rapid prototyping technology to ear mold production. **Fourth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCET'2006)**. Mayagüez, Puerto Rico, 2006.
- DANE, F. **Research Methods**. Los Angeles, CA: Brooks/Cole Pub. Co. California University, 1990.
- DINDA, G. P.; DASGUPTA, A. K.; MAZUMDER, J. Laser aided direct metal deposition of Inconel 625 superalloy: Microstructural evolution and thermal stability. **Materials science and engineering**, v. 509, p. 98-104, 2009.
- FINK, A. **Conducting research literature reviews: From paper to the Internet**. Thousand Oaks, CA: Sage, 2005.
- GENERAL ELETRIC. **Additive Manufacturing is reinventing the way we work**. Disponível em: <<https://www.ge.com/stories/additive-manufacturing>>. Acesso em: 18 fev. 2014.
- GERAEDTS, J.; VERLINDEN, E. D. J.; STELLINGWERFF, M. Three views on additive manufacturing: business, research and education. **Proceedings of TMCE 2012**. Karlsruhe: TMCE. 2012.
- GIANNATSI, J.; DEDOISSIS, V. Additive fabrication technologies applied to

medicine and health care: a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, p. 116-127, 2009.

GIBSON, I.; ROSEN, D. W.; STUCKER, B. **Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct Digital manufacturing**. Nova York: Springer, 2009.

GIBSON, I.; CHEUNG, L. K.; CHOW, S. P.; CHEUNG W. L.; BEH, S. L.; SAVALANI, M.; LEE, S. H. The use of rapid prototyping to assist medical applications. **Rapid Prototype Journal**, v. 12, n. 1, p. 53-58. 2006.

GOLDSBERRY, C. (2009). **Rapid change in additive manufacturing landscape**. Plastic Today. Disponível em: <<http://www.plasticstoday.com/articles/rapid-change-additive-manufacturing-landscape>>. Acesso em: 18 fev. 2014.

GUO, N.; LEU, M. C. Additive manufacturing: technology, applications and research needs. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 215-243. 2013.

HAN, L.; LIOU, F.; PHATAK, K. **Modeling of laser cladding with powder injection**. Metallurgical and materials transactions b-process metallurgy and materials processing science, v. 35, p. 1139-1150, 2004.

HOLMSTRÖM, J.; PARTANEN, J.; TUOMI, J.; WALTER, M. Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: alternative approaches to capacity deployment. **Journal of Manufacturing Technology Management**, v. 21, n. 6, p. 687-697. 2010.

HOPKINSON, N.; DICKENS, P. M. Analysis of rapid manufacturing – Using layer manufacturing processes for production. Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, **Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**, London, p.31–39, 2003.

HOPKINSON, N.; HAGUE, R. J. M.; DICKENS, P. M. **Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age**. Chichester: John Wiley & Sons, 2006.

HU, D.; KOVACEVIC, R. Sensing, modeling and control for laser-based additive manufacturing. **International journal of machine tools & manufacture**, v. 43, p. 51-60, 2003.

HUANG, S.; LIU, P.; MOKASDAR, A. Additive manufacturing and its societal

impact. **International Journal of Advanced Manufacturing**, v. 67, p. 1191-1203, 2013.

KHAJAVI, S. H.; PARTANEN, J.; HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. **Computers in Industry**, v. 65, n. 1, p. 50-63, 2014.

KOBRYN, P.; SEMIATIN, S. The laser additive manufacture of Ti-6Al-4V. **Journal of the minerals metals & materials society**, v. 53, p. 40-42, 2001.

KRUTH, J.; LEU, M.; NAKAGAWA, T. Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 47, p. 525-540, 1998.

LEVY, G. The role of the Laser Technology in the Additive Manufacturing environment. **Physics Procedia**, v. 5, p. 65-80, 2010.

Levy, G., Schindel, R.; Kruth, J. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies: state of the arte and future perspectives. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 52, p. 589-609, 2003.

LAN, P.; CHOU, S.; CHENT, L.; GEMMILL, D. Determining fabrication orientations for rapid prototyping with stereolithography apparatus. **Computer-Aided Design**, v. 2, p. S-62, 1997.

LUO, Y.; JI, Z.; LEU, M.C; CAUDILL, R. Environmental performance analysis of solid freeform fabrication processes. **The 1999 IEEE International Symposium on Electron and the Environ**, p. 1-6, New York: IEEE, 1999.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. **Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy**, 2013.

MARTINA, F.; MEHNENB, J.; WILLIAMSA, S.; COLEGROVEA, P. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 212, p. 1377-1386, 2012.

METZGER, P.; MUSCATELLO, A.; MUELLER, R. Affordable, Rapid Bootstrapping of the Space Industry. **Journal of Aerospace Engineering**, v. 26, p. 18-29, 2013.

MERCELIS, P.; KRUTH, J.P. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. **Rapid prototyping journal**, v. 12, p. 254-265, 2006.

MORROW, W.; QI, H.; KIM, I.; MAZUMDER, J.; SKERLOS, S. Environmental

aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, p. 932-943, 2006.

MOTA, C. **The rise of personal fabrication**. C&C '11, p. 279-288, 2011.

MURR, L. E.; GAYTAN, S.M.; MEDINA, F.; LOPEZ, H.; MARTINEZ, E.; MACHADO, B. I.; HERNANDEZ, D. H.; MARTINEZ, L.; LOPEZ, M. I.; WICKER, R. B.; BRACKE, J. **Next-generation biomedical implants using additive manufacturing of complex, cellular and functional mesh arrays**. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, v. 368, p. 1990-2032, 2010.

OPTOMECH. **Metal Components**. 2006. Disponível em: <<http://www.optomech.com/Additive-Manufacturing-Applications/Laser-Additive-Manufacturing>>. Acesso em: 14 fev. 2006.

PINKERTON, A.; LI, L. Modelling the geometry of a moving laser melt pool and deposition track via energy and mass balances. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 37, p. 1885-1895, 2004.

REEVES, P. **Additive Manufacturing - A supply chain wide response to economic uncertainty and environmental sustainability**. Derbyshire, UK: Econolyst Limited, 2008.

RODRIGUEZ, A. R.; NAVARRO, J. R. Changes in the intellectual structure of strategic management research: a bibliometric study of strategic management journal. **Strategic Management Journal**, v. 25, p. 981-1004, 2004.

SACHLOS, E.; CZERNUSZKA, J. T. Making tissue engineering scaffolds work. Review: the application of solid freeform fabrication technology to the production of tissue engineering scaffolds. **European Cells & Materials**, v. 5, p. 29-39, 2003.

SANGHERA, B.; NAIQUE, S.; PAPA HARILAOU, Y.; AMIS, A. Preliminary study of rapid prototype medical models. **Rapid Prototype Journal**. v. 7, n. 5, p. 275-284. 2001.

SEALY, W. Additive manufacturing as a disruptive technology: how to avoid the pitfall. **American Journal of Engineering and Technology Research**, v. 12, n. 1, p. 86-93, 2012.

SERBAN, D. A.; GRECO, P.; MELINTE, S.; VLAD, A.; DUTU, C. A.; ZAC-

CHINI, S.; IAPALUCCI, M. C.; BISCARINI, F.; CAVALLINI, M. Towards All-Organic Field-Effect Transistors by Additive Soft Lithography. **Small**, v. 5, p. 1117–1122, 2009.

SERRES, N. T. Environmental comparison of MESO-CLAD process and conventional machining implementing life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, p. 1117-1124, 2011.

SONG, Y.; YAN, Y.; ZHANG, R.; XU, D.; WANG, F. Manufacturing of the die of an automobile deck part based on rapid prototyping and rapid tooling technology. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 120, p. 237-242, 2002.

SREENIVASAN, R.; GOEL, A.; BOURELL, D. Sustainability issues in laser-based additive manufacturing. **Physics Procedia**, v. 5, p. 81-90, 2010.

STRANO, G.; HAO, L.; EVERSON, R.; EVANS, K. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v.66, p.1247-1254, 2013.

STRATASYS. **FDM Thermoplastics**. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/materials/fdm>>. Acesso em: 11 fev. 2014.

TEAMSAI. **A time for renewal: the global MRO forecast 2013-2023**. 2013 MRO Americas Conference. Presented by: David A. Marcontell. Disponível em: <http://teamsai.com/media/content/2013_TeamSAI_Global%20MRO_Forecast_PRINT%20VER%20with%20Audio%20130411F.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2013.

THE ECONOMIST. **The Third Industrial Revolution**, Matéria divulgada na edição impressa de 21 de abril de 2012. Disponível em: <<http://www.economist.com/node/21552901>>. Acesso em: 06 fev. 2012.

THE ECONOMIST. **Advanced manufacturing: Adding and taking away**, 31 de dezembro de 2013. Disponível em: <<http://www.economist.com/blogs/babbage/2013/12/advanced-manufacturing>>. Acesso em: 06 fev. 2013.

THIJS, L.; VERHAEGHE, F.; CRAEGHS, T.; VAN HUMBEECK, J.; KRUTH, J. P. A study of the micro structural evolution during selective laser melting of Ti-6Al-4V. **Acta materialia**, v. 58, p. 3303-3312, 2010.

THOMAS, C. L.; GAFFNEY, T. M.; KAZA, S.; LEE, C. H. Rapid prototyping of

large scale aerospace structures. **Proceedings of Aerospace Applications Conference**, p. 219-230. Aspen, CO: IEE, 1996.

UPCRAFT, S.; FLETCHER, R. The rapid prototyping technologies. **Assembly Automation**, v. 23, n. 4, p. 318–330, 2003.

VAYREA, B.; VIGNATA, F.; VILLENEUVEA, F. Designing for Additive Manufacturing. **CIRP Conference on Manufacturing Systems**, p. 632 – 637, 2012.

VRANCKEN, B.; THIJS, L.; KRUTH, J.P; HUMBEECK, J.V. Heat treatment of Ti6Al4V produced by Selective Laser Melting: Microstructure and mechanical properties. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 541, p. 177-185, 2012.

WEBSTER, S. A. **Additive Manufacturing: A Custom Solution for the Medical Industry**. April. Disponível em: <<http://www.sme.org/MEMagazine/Article.aspx?id=72078>>. Acesso em: 12 fev. 2013.

WIRED, **The New MakerBot Replicator Might Just Change Your World**, matéria divulgada na edição impressa de Outubro de 2012. Disponível em: <<http://www.wired.com/design/2012/09/how-makerbots-replicator2-will-launch-era-of-desktop-manufacturing/all/>>. Acesso em: 06 fev. 2012

YADROITSEV, I.; GUSAROV, A.; YADROITSAVA, I.; SMUROV, I. Single track formation in selective laser melting of metal powders. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, p. 1624-1631, 2010.