



ConBRepro

X CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO



02 a 04
de dezembro 2020

Oportunidades de *Design* Para A Manufatura Aditiva.

João Filipe de Rezende Martins

Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná - UFPR

Fabiano Oscar Drozda

Pós-Graduação em Engenharia de Produção - Universidade Federal do Paraná - UFPR

Resumo: A Manufatura Aditiva (MA) representa uma variedade de tecnologias de fabricação em desenvolvimento. Também conhecida como prototipagem rápida, fabricação rápida e impressão tridimensional (3D). Um dos aspectos mais promissores da manufatura aditiva é a possibilidade de criar geometrias altamente complexas. Apesar do crescente conhecimento sobre os desafios tecnológicos, faltam métodos que permitam aos *designers* lidar com as novas possibilidades de forma eficaz. Este artigo apresenta uma pesquisa sobre o impacto que a manufatura aditiva pode ter no *design*. A pesquisa teve como foco as novas oportunidades de processos de fabricação, a relação entre estrutura e desempenho e abordagens de otimização. Aplicamos o modelo da cadeia de três elos para relacionar a estrutura do produto com o desempenho, ligados por força, rigidez, conformidade, propriedades dinâmicas, e visuais. Os resultados mostram que há um crescente conhecimento na área de *design* para manufatura aditiva. O conhecimento sobre materiais, otimização computacional, *design* auxiliado por computador e simulação comportamental incorporam assuntos distintos. Isso está em contraste com a engenharia de *design*, que requerem uma abordagem mais abstrata para conceber e desenvolver novos produtos.

Palavras-chave: Manufatura Aditiva, *Design*, Otimização, Estruturas.

Design Related Opportunities for Additive Manufacturing.

Abstract: Additive Manufacturing (AM) represents a variety of manufacturing technologies under development. Also known as rapid prototyping, rapid fabrication and three-dimensional (3D) printing. One of the most promising aspects of additive manufacturing is the possibility of creating highly complex geometries. Despite growing knowledge about technological challenges, there is a lack of methods that allow designers to deal with new possibilities effectively. This article presents a research on the impact that additive manufacturing can have on design. The research focused on new manufacturing process opportunities, the relationship between structure and performance and optimization approaches. We apply the three-link chain model to relate product structure to performance, linked by strength, rigidity, compliance, dynamic, and visual properties. The results show that there is growing knowledge in the area of design for additive manufacturing. Knowledge about materials, computational optimization, and computer aided design and behavioral simulation incorporate different subjects. This is in contrast to design engineering, which require a more abstract approach to conceptualize and develop new products.

Keywords: Additive Manufacturing, Design, Optimization, Structures.

1. Introdução

Manufatura aditiva (MA) é uma variedade de tecnologias de produção em desenvolvimento, também conhecidas como Prototipagem Rápida (PR), Manufatura Rápida (MR) e impressão tridimensional (3D). Os processos de MA podem fabricar objetos diretamente do 3D, e modelar produtos adicionando material camada sobre camada. Originalmente MA era usada para prototipagem, no entanto, à medida que a velocidade, as propriedades do material e a acessibilidade melhoram, nós observamos uma tendência de produção de produtos finais utilizando a MA (WOHLERS REPORT, 2010). Em comparação com a produção convencional, como usinagem, fundição e moldagem por injeção, a MA oferece possibilidades sem precedentes em complexidade de forma e geometrias personalizadas. Produtos recentes, conforme Figura 1, que mostra uma perna mecânica produzida pela Techij, isso demonstra que há um impulso para usar essas técnicas na prática, utilizando processos como a Fabricação com Filamentos Fundidos (FFF).

Figura 1 - Perna Mecânica Fabricada por Manufatura Aditiva de Polímeros.



Fonte: Techij (2020).

Pesquisas sobre a MA são amplamente cobertas nas áreas de materiais, software e novos processos. Apesar de um crescimento no conhecimento sobre os desafios tecnológicos, muita pouca pesquisa foi realizada sobre os métodos que permitiriam aos *designers* se beneficiarem com as novas possibilidades da MA. É necessário o desenvolvimento de novos métodos de *design*, a fim de se beneficiar das oportunidades que a MA tem para oferecer em toda a sua extensão (BOURELL, 2009). Uma das possibilidades promissoras de MA é lidar com a complexidade de geometrias, que é especificamente benéfico quando combinado com métodos para otimização. Podem ser geradas geometrias que são otimizados para resistência e volume do material. O exemplo da Figura 1, demonstra uma estrutura construída por MA, que é até 50% mais leve que seus convencionais equivalentes e mantém a conformidade com os requisitos mecânicos (WOHLERS T., 2010). Métodos devem ser desenvolvidos para permitir que o *design* de produtos da MA, superem produtos atuais em termos de uso de material, peso, resistência, rigidez etc. Este artigo irá discutir o estado da arte em tecnologias e *design* da MA, assim como, ferramentas que podem permitir o projeto e a fabricação de novas estruturas. Isso levará à discussão sobre as possibilidades e desafios da aplicação da MA. Para essas novas estruturas, pretende-se formular a agenda de pesquisa para auxiliar no desenvolvimento dos métodos de *design* desejados.

2. Metodologia

Para investigar o estado da arte da MA e suas implicações para o *design* do produto, realizou-se uma revisão da literatura, cobrindo as conferências sobre *design* de produtos de MA, periódicos sobre prototipagem rápida, pesquisas de *design*, de engenharia, e artigos de conferências de computação gráfica. Nossas perguntas de pesquisa foram:

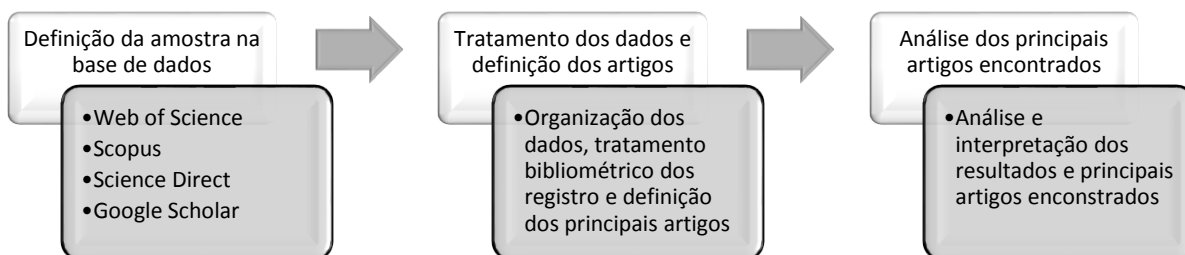
- Como pode-se considerar a relação entre estrutura e desempenho?
- Quais são as tendências nas técnicas de fabricação manufatura aditiva e como podem impactar o *design* e a realização do produto?
- Quais métodos foram propostos para otimizar desempenho?
- Quais são as oportunidades e limitações para a criação de *designs* ideais? O corpo de conhecimento pesquisado cobre os campos de materiais, software e novos processos.

As questões acima foram usadas para caracterizar as descobertas e raciocinar sobre seu impacto futuro no *design* do produto.

É importante destacar que a análise sistemática da bibliografia não substitui o estudo aprofundado e qualitativo dos textos, dessa forma, os principais artigos encontrados foram analisados detalhadamente.

Para o desenvolvimento da pesquisa de acordo com os objetivos descritos na introdução foram estabelecidas três etapas, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Etapas da Pesquisa

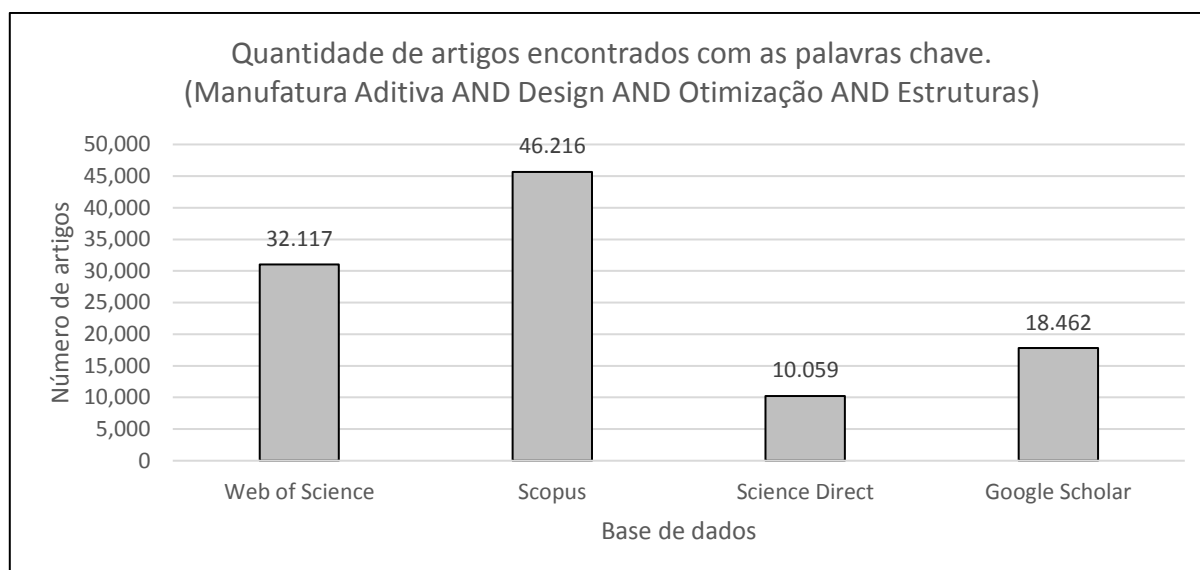


Fonte: Os Autores (2020)

A definição dos periódicos à serem utilizados como amostra na análise sistemática seguiu primeiramente na escolha das bases de dados, identificação das palavras-chaves para busca dos artigos (que são as palavras chave do artigo), escolha de anos de publicação, seleção de tipo de documento a serem analisados e critérios para exclusão de artigos que não se enquadram no escopo do trabalho, por meio de análise de título e resumo, além da exclusão de artigos por duplicidade.

A seguir elaborou-se um gráfico de barras que demonstra a quantidade de artigos encontrados em cada base de dados que foi pesquisada. Utilizando as palavras chave do artigo: Manufatura Aditiva, *Design*, Otimização e Estruturas. Criou-se um código de busca para encontrar os artigos ou periódicos de interesse ao tema desenvolvido, como podemos ver na Figura 3.

Figura 3 - Volume de artigos por base de dados.



Fonte: Os Autores (2020)

A partir desses artigos selecionados, em cada base de dados foram inseridas formas diferentes de filtro, para obter os artigos específicos para análise, pois em cada base de dados existe um sistema de buscas diferenciado para delimitação do tema. No entanto, o objetivo comum foi encontrar artigos mais específicos e direcionados ao tema em questão. E com isso foram escolhidos 17 artigos que estão nas no capítulo de Referências deste artigo.

3. Aplicações e tendências na manufatura aditiva

Inicialmente a MA limitava-se à produção de protótipos, mas melhorias contínuas na velocidade, qualidade de superfície, material, propriedades e preço deram lugar à produção de produtos em um número crescente de mercados (WOHLERS REPORT, 2010). Wohlers mencionou que vantagens como, redução de ferramentas e consolidação de peças, podem ser incentivos para empresas usarem a manufatura aditiva para produção de peças finais. Os incentivos podem ser econômicos, ambientais ou relacionados ao desempenho físico ou financeiro. Reeves P. (2007) demonstrou uma metodologia de seis etapas para as empresas determinar se a MA poderia ser um método favorável de produção. Na primeira etapa, a “Identificação de Benefícios e Incentivos para a Adoção de MR”. Reeves propõe começar com três perguntas. Em relação ao processo de produção, a empresa deve refletir se a MA vai permitir a criação de partes que de outra forma seriam impossíveis de se fabricar ou economicamente inviáveis. Comercialmente, deve-se considerar se uma peça geometricamente complexa forneceria alguma vantagem ou melhoraria a posição competitiva da empresa. Finalmente, a pergunta que deve ser feita é se há alguma funcionalidade adicional, que de outra forma seria impossível de se atingir. As etapas seguintes envolvem a seleção de materiais e processos de MA, cálculo de custos para a parte produzida, e a análise do benefício de custo econômico poupado dentro da cadeia de fornecimento.

Consolidação de peças: Boeing está usando peças sinterizadas a laser no jato comercial Boeing 787. Elementos para dutos de ar que caso contrário, seriam um conjunto de até 15 peças são reduzidas para apenas uma parte complexa (WOHLERS T., 2010).

Redução de peso: Como mencionado anteriormente, a liberdade de geometria da MA permite um *design* ideal para reduzir peso. Temos vários exemplos disso acontecendo principalmente com a uma função bem útil da manufatura aditiva, que é a possibilidade de escolher a densidade de preenchimento das peças.

Customização funcional: O setor médico necessita de uma grande gama de produtos personalizados. A MA está sendo usada em implantes de articulação, coroas e pontes dentárias (WOHLERS T., 2010), e a produção de aparelhos auditivos customizados com ajuste perfeito (ZOUHAR A., 2008).

Personalização: A capacidade de criar produtos únicos é também utilizada pela indústria do entretenimento. *FigurePrints* (2020) permite que os usuários solicitem uma cópia física de seu personagem favorito impressa em 3D, e *ThatsMyFace* (2020), utilizando scanners e a impressão 3D, imprimi uma representação da cabeça do usuário.

Estética: Empresas como *Freedom of Creation* tem projetado produtos de consumo artístico, frequentemente consistindo em geometrias complexas que seriam difíceis ou impossíveis de fabricar usando métodos tradicionais.

3.1 Fabricação sob demanda

As aplicações possíveis da MA, para produtos continua a se expandir, a literatura assume que a MA terá uma grande influência no ciclo de desenvolvimento do produto; o caminho que os produtos são projetados, produzidos, distribuídos, consumidos e reciclado. Este fenômeno de fabricação digital permite fabricação sob demanda, resultando em pequenos volumes de produtos que são produzidos localmente, com pouco ou nenhum estoque. Além disso, o roteiro para MA indicou o aumento de produtos personalizados e peças (sobressalentes) que podem atender econômica e funcionalmente a produção tradicional técnicas como moldagem por injeção (ROSEN D., 2009). Além disso, o surgimento de dispositivos de MA caseiros como o RepRap indica o poder de fabricação democratizada - uma rede globalmente conectada de infraestrutura aberta e disponível gratuitamente que capacita os consumidores para se tornarem produtores.

3.2 Processos manufatura aditiva

Conforme encontrado no relatório de Wohlers T., (2010), atuais melhorias nos processos de fabricação focam principalmente na velocidade, resolução, materiais, e suporte técnico. Um resumo é fornecido na sequência.

Velocidade e resolução: Várias otimizações mecânicas foram apresentadas para aumentar a velocidade de fabricação. A fim de utilizar totalmente a capacidade multieixo, um novo método de fatiamento é apresentado por KANAKANALA et al. (2010). Para melhorar a eficiência, minimizando o caminho ocioso, Routhu S., (2010), apresenta um método para calcular padrões de ziguezague específicos. Em processos normais de manufatura em camadas com máquinas de 3 eixos, a direção da construção é fixada em todo processo. Multi-eixos (movimento em mais de 3 eixos) afetam o processo de deposição, e a orientação da peça pode afetar a capacidade de construção sem o suporte que outras precisariam.

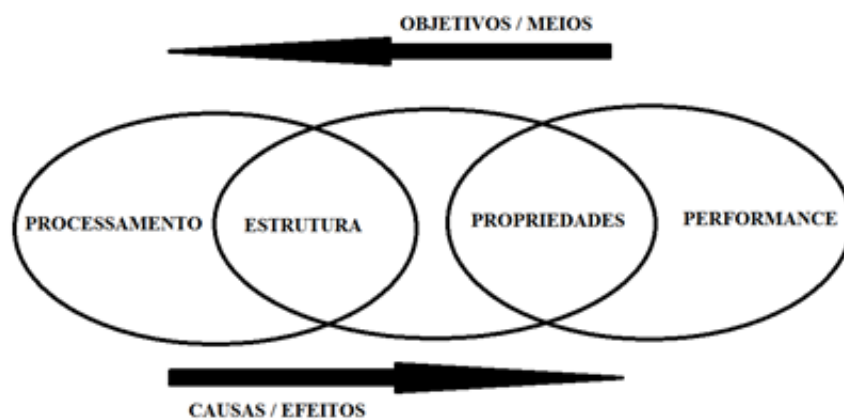
Materiais: Os materiais utilizados na MA podem ser categorizados em polímeros, metais, cerâmicas e orgânicos materiais. A escolha dos materiais é fortemente determinada pelo tipo de processo MA, especialmente para polímeros. As primeiras máquinas MA eram limitadas a polímeros. No entanto, os desenvolvimentos recentes deram lugar para materiais melhorados. Por exemplo, a EOS desenvolveu o termoplástico 'PEEK HP3' para sinterização seletiva a laser, que também tem boa resistência e excelente desempenho em altas temperaturas (Wohlers T., 2010), esse material também tem uma variante que pode ser usada em impressoras de FFF modificadas. Parece difícil fornecer propriedades inequívocas de materiais impressos, pois essas propriedades podem ser fortemente dependendo em parâmetros de fabricação, como orientação da peça, velocidade de construção e caminhos da ferramenta (WRIGHT P. K., 2002).

4. Design de projeto para manufatura aditiva

Para pensar sobre as possibilidades que a tecnologia de MA permite, baseamos nossa abordagem no modelo da cadeia de três elos (3LCM), que se originou do domínio das ciências materiais (Medellin H., 2005). Este modelo, ilustrado na Figura 4, considera as relações lineares entre os elementos: desempenho, propriedades, estrutura e processo. Originalmente, o 3LCM vincula ciência dos materiais a engenharia dos materiais. A análise de materiais segue o caminho dedutivo, investigando a estrutura do material devido ao seu processamento e dedução das propriedades e o desempenho pela lógica de causa e efeito.

De forma complementar, a engenharia de materiais segue um caminho indutivo determinando o desempenho e as propriedades desejadas. Assim como as estruturas dos materiais que atendem a este desempenho e processos que resultam nas estruturas desejadas. O método 3LCM é focado principalmente no *design* de novas estruturas, que somente são possíveis de se criar através da fabricação aditiva.

Figura 4 - Corrente dos 3 Elos.



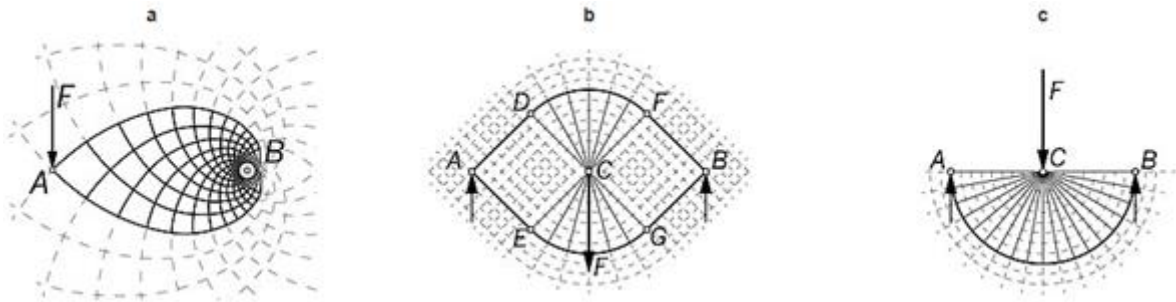
Fonte: Olson G. B., (1997).

Para alcançar o comportamento desejado do produto, o *designer* pode determinar propriedades específicas. Essas propriedades podem ser baseadas e comportamentos desejados quantificáveis, como peso máximo e resistência mecânica, ou menos fáceis de quantificar como propriedades visuais. A estrutura é o layout físico que diretamente controla as propriedades do produto. Essas estruturas podem ser características do produto, como alças, ranhuras ou aletas de resfriamento, ou menores e menos aparentes como na forma de estruturas celulares que constroem elementos, ou ainda menores, no nível do material, densidade ou estrutura do material. O processo de MA pode ser utilizado para criar uma estrutura necessária, e sua funcionalidade verificada na forma de simulação. Começando com uma tecnologia MA, um *designer* pode deduzir quais estruturas um processo específico de MA pode produzir. Essas estruturas influenciam as propriedades do produto e, portanto, pode-se argumentar se o desempenho do produto será satisfatório. Normalmente, um processo de *design* não segue isoladamente nenhuma dessas duas direções, mas sim um processo iterativo.

4.1 Propriedades de rigidez e resistência

O objetivo de alcançar a resistência ou rigidez desejada de uma estrutura usando uma quantidade mínima de material é um central objetivo em engenharia. Mais de 100 anos atrás foi mostrado que o peso de uma estrutura atinge um mínimo teórico quando todos os elementos seguem o caminho de tensão máxima magnitude (MICHELL A. G. M., 1904). Um exemplo de tal estrutura é ilustrado em Figura 5. Embora Michell elaborou requisitos para estas estruturas, construí-los para qualquer layout não trivial é complexo e, portanto, não prático para a maioria das aplicações.

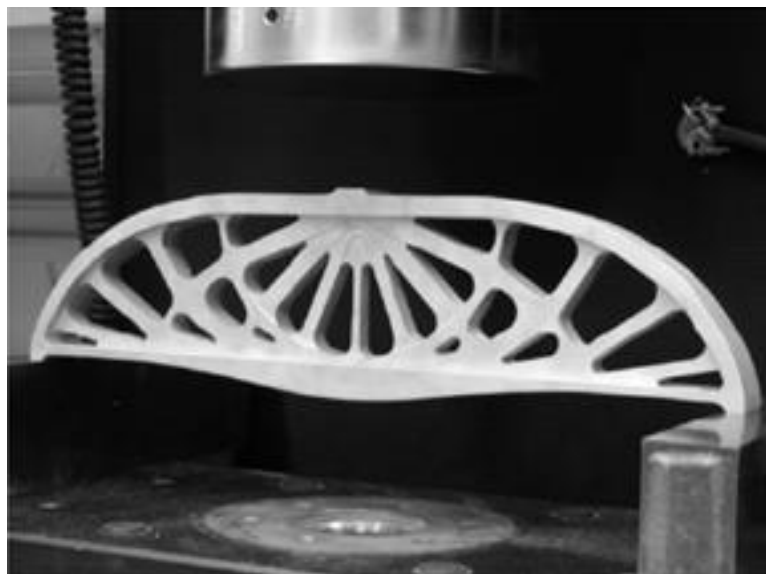
Figura 5 - Estruturas Michell.



Fonte: Michell A. G. M., (1904)

Um exemplo de Estruturas de Michell fisicamente testadas na Figura 6, mostraram concordância com as propriedades teóricas em termos de rigidez e resistência (SRITHONGCHAI S., 2003). Os experimentos incluíram vigas que foram produzidas usando tecnologia de manufatura aditiva Laser Seletivo Sinterização (LSS) de nylon.

Figura 6 - Representação física da estrutura de Michell sendo testada



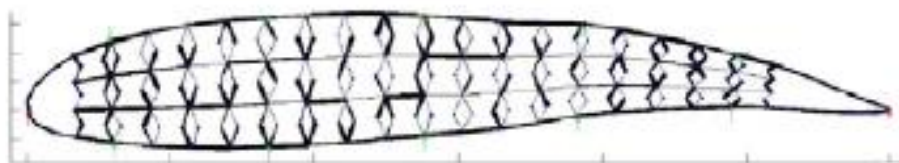
Fonte: Srithongchai S., (2003)

As restrições para fabricação são levadas em consideração. No entanto, os resultados são estruturas otimizadas, resistentes e rígidas, que são facilmente fabricadas.

4.2 Propriedades de conformidade

Oposto à rigidez máxima, em alguns casos é preferido atingir uma certa quantidade de conformidade em uma estrutura. O resultado é uma meso-escala em camadas, estrutura celular que é avaliada por sua fabricação, usando processo MA multi-material. Os autores também dão um exemplo de como seu método é aplicado na modelagem de um aerofólio morfado, ilustrado na Figura 7 (Chu C et al. 2008). Seu processo permite que uma estrutura celular seja otimizada para se transformar na forma desejada com uma determinada carga.

Figura 7 - - Projeto da Asa Morfada.



Fonte: Chu C et al. (2008).

A otimização para conformidade na escala macro é sua abordagem é focada na elaboração do processo de otimização em si e não nas possíveis aplicações das estruturas. A otimização é capaz de gerar construções que resultam em um formato desejado em uma extremidade, dado uma força de entrada em outro lugar da estrutura (ZHOU H., 2010).

4.3 Propriedades dinâmicas

Métodos de otimização de topologia foram desenvolvidos para melhorar a estabilidade dinâmica de estruturas de rede (TAKEZAWA A., et al 2005). Esta abordagem concentra-se especificamente na fase de projeto conceitual de estruturas mecânicas. Segundo os autores, nesta fase o problema da estabilidade dinâmica é resolvido maximizando a frequência própria da estrutura.

4.4 Propriedades Visuais

Propriedades visuais na área de *Design* Industrial pode ser considerada tão importante quanto a mecânica propriedades, este tópico é pouco abordado na literatura, são alguns desenvolvimentos no campo da computação gráfica que utiliza os recursos exclusivos dos sistemas de manufatura aditiva de múltiplos materiais.

5 Considerações Finais

Para considerar a relação entre estrutura e desempenho, o modelo da cadeia de três elos utiliza o paradigma central de materiais e engenharia científica que é uma boa abordagem para vincular estruturas com propriedades e para abordar os tipos de soluções que realmente devem ser feitas. Chu C et al. (2008), utiliza este paradigma no desenvolvimento de um método para projetar estruturas. Em sua abordagem, apenas três características de desempenho são abordadas: peso mínimo, distribuição de conformidade e mecanismos de movimento. De acordo com as propriedades desejadas de qualquer um desses problemas, uma estrutura é desenvolvida e usada em um volume de produto. Nós expandimos isso para um escopo mais amplo como o paradigma original implícito.

Em relação às tendências nas técnicas de fabricação manufatura aditiva e como podem impactar o *design* e a fabricação do produto, embora existam muitas melhorias sendo feitas nas técnicas de fabricação MA, a maioria é feita na indústria. Na área acadêmica encontra-se uma série de artigos investigando novas técnicas para otimizar velocidade, precisão de camadas. Além disso, identifica-se o progresso em materiais que estão contribuindo para o uso de MA para produtos finais assim como para aplicações médicas e de alta demanda mecânica.

Dentre os métodos que foram propostos para otimizar o desempenho, identifica-se que a força e rigidez otimizadas para peso são amplamente cobertas e são promissoras para produtos fabricados pela MA. Outras propriedades e aspectos, como superfície, ambiental, estética, ergonomia, velocidade de produção, personalização precisam ser endereçadas a fim de se ter um sistema de *design* para manufatura aditiva completo.

As oportunidades e limitações para a criação de projetos ideais, podem ser consideradas a partir do campo físico da tecnologia e materiais MA, e do campo digital das ferramentas CAD. Portanto não se entrou em detalhes de cada método, mas sim, de mencionar os fatores importantes que influenciam na aplicabilidade de um sistema MA para um *design* ideal. Ao construir mesoestruturas, o método de suporte do sistema MA se torna importante. Processos de MA que usam uma estrutura de suporte sólida, como estereolitografia são menos favoráveis para a criação de mesoestruturas porque eles exigem a remoção manual da estrutura de suporte, que pode ser demorado ou, em alguns casos, impossível. Os desafios que permanecem são a capacidade de conseguir aplicar essas novas estruturas em produtos. Para alcançar isto, algoritmos devem ser desenvolvidos e integrados ao CAD. Finalmente, formatos de arquivo 3D que são usados para construir objetos CAD em máquinas de MA, como o formato de *Standard Tecellation Language* (STL), tornaram-se um modelo padrão, mas não são adequados para a representação da maioria das estruturas descritas neste artigo. Formas com muitas características, como estruturas de treliça, resultam em arquivos grandes e não práticos, também há limitações na capacidade de alterar propriedades e material sendo utilizado.

Acreditamos que a MA tem a capacidade de mudar radicalmente os produtos e o processo de desenvolvimento do produto. Para conseguir isso, ferramentas de design precisam ser desenvolvidas, das quais este trabalho é um passo inicial.

Referências

Ahn S.-H., Montero M., Odell D., Roundy S., and Wright P. K., 2002, “**Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS**,” *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), pp. 248-257.

Anderson C., 2006, *The Long Tail: Why the Future of Business is Selling Less of More*, Hyperion.

Bourell D. L., Leu M., and Rosen D., 2009, “**Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing**,” The University of Texas, Austin

Chu C., Graf G., and Rosen D. W., 2008, “**Design for Additive Manufacturing of Cellular Structures**,” *Computer-Aided Design and Applications*, 5(5), pp. 686- 696.

“**FigurePrints**,” URL <http://www.figureprints.com>. Acesso setembro 2020.

“**Freedom of Creation**,” URL <http://www.freedomofcreation.com>, Acesso setembro 2020.

“**ThatsMyFace Web Page**,” URL <http://www.thatsmyface.com>. Acesso setembro 2020.

Gershenfeld N., 2005, *FAB: The Coming Revolution on Your Desktop--From Personal Computers to Personal Fabrication*, Basic Books, New York, NY.

Kanakanala D., Routhu S., Ruan J., Liu X. F., and Liou F., “**A Multi-Axis Slicing Method for Direct Laser Deposition Process**,” *Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Quebec, Canada. DETC2010- 28442.

Medellin H., Lim T., Corney J., Ritchie J. M., and Davies J. B. C., “**Automatic Decomposition and Refinement of Oversized Components for Rapid Prototyping**,” *Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Long Beach, California. DETC2005-84457.

Michell A. G. M., 1904, “**LVIII. The limits of economy of material in frame-structures**,” *Philosophical Magazine Series 6*, 8(47), pp. 589-597.

- Olson G. B., 1997, "**Computational Design of Hierarchically Structured Materials**," Science, 277(5330), pp. 1237-1242.
- Reeves P., 2007, "**Rapid Manufacturing–Business implementation & global economic value**," Econolyst Ltd, UK.
- Sells, E., Bailard, S., Smith, Z., Bowyer, A., & Olliver V., 2009, **RepRap: The Replicating Rapid Prototypermaximizing customizability by breeding the means of production**, World Scientific Publishing Company, Singapore.
- Slabaugh G., Fang T., Mcbagonluri F., and Zouhar A., 2008, "**3D Shape Modeling for Hearing Aid Design**," IEEE Signal Processing Magazine, 5(25), pp. 98-102.
- Srithongchai S., 2003, "**A theoretical and experimental investigation of a family of minimum-weight simplysupported beams**," International Journal of Mechanical Sciences, 45(1), pp. 37-55.
- Wohlers T., 2010, Wohlers Report 2010, **Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report**, Wohlers Associates, Inc, Fort Collins, Colorado.
- Zheng B., and Gea H. C., 2005, "**Structural topology optimization under design-dependent loads**," Proceedings of the ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Long Beach, California. DETC2005-85605.
- Zhou H., 2010, "**Topology Optimization of Compliant Mechanisms Using Hybrid Discretization Model**," Proceedings of the ASME 2010 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, Montreal, Quebec, Canada. DETC2010-28150.