

Análise comparativa dos processos de prototipagem rápida aditiva e subtrativa no desenvolvimento de produtos*Comparative analysis of the processes of additive and subtractive rapid prototyping applied in the development of products*

Conrado Renan da Silva, Raul Molina Jeronymo & Tomás Queiroz Ferreira Barata

Corte a laser; Impressão 3D; Metrologia Óptica; Prototipagem rápida;

Este artigo propõe uma análise comparativa do uso das tecnologias de prototipagem rápida aditiva e subtrativa através de informações de produção e de inspeção por digitalização tridimensional com o objetivo de elaborar dados para o desenvolvimento de produtos. A fundamentação teórica abordou os conceitos essenciais que definem as tecnologias aqui tratadas através dos seguintes tópicos: a) Tecnologias aditivas; b) Tecnologias subtrativas e; c) Sistema de digitalização óptica 3D. A pesquisa foi realizada junto ao Laboratório Didático de Materiais e Protótipos – LDMP e o Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos - CADEP do campus da UNESP de Bauru. Como procedimentos metodológicos, foi adotado o método indutivo, de natureza aplicada, com abordagem quanti-qualitativa que explorou limitações e características dos processos de impressão 3D por filamento e corte a laser, buscando estabelecer parâmetros operacionais confiáveis, tendo em vista que tais informações são escassas na literatura. Através da digitalização tridimensional foi possível realizar uma análise da superfície das peças, bem como a fidelidade dos modelos físicos aos modelos digitais, usando da elaboração de mapas de cores comparativos que determinam os desvios máximos e mínimos. Como resultados, são apresentados dados comparativos das peças produzidas nos processos aditivos e subtrativos e os parâmetros operacionais para cada uma delas. Foram constatados problemas na qualidade das peças que só foram possíveis de serem identificados por meio da inspeção tridimensional, demonstrando ser uma ferramenta relevante para esse tipo de análise aqui apresentada.

Laser cutting; Filament 3D printing; Optical Metrology; Rapid Prototyping;

This paper proposes a comparative analysis of the use of additive and subtractive rapid prototyping technologies through information of the production and the inspection by three-dimensional digitizing in order to obtain data for product development. The theoretical basis approached topics of essential concepts that defines the technologies through the following items: a) Additive technologies; b) Subtractive technologies and; c) 3D optical scanning system. The research was made out with the Didactic Laboratory of Materials and Prototypes - LDMP and the Advanced Center for Product Development - CADEP at the UNESP campus in Bauru. As methodological procedures, the inductive method was applied, with a quantitative-qualitative approach that explored the limitations and characteristics of the processes of filament 3D printing and laser cutting, seeking to establish reliable operational parameters, considering that such information is scarce in literature. Through three-dimensional scanning, it was possible to perform an analysis of the surface of the parts, as well as the fidelity of the physical models to the digital data, using the elaboration of comparative color maps that determine the maximum and minimum deviations. As results, comparative data are presented of the produced parts in the additive and subtractive processes and the operational parameters for each of them. Problems were observed in the quality of the parts that were only possible to be identified through three-dimensional inspection, proving to be a relevant tool for this type of analysis presented here.

1 Introdução

Na atualidade, muito se discute acerca do uso das novas tecnologias de prototipagem rápida e fabricação digital para o desenvolvimento de produtos, em consequência disso, nota-se que a contemporaneidade tem passado por diversas mudanças e desafios que vão desde questões sociais e ambientais até políticas e tecnológicas, que irão exigir que os designers lidem com problemas cada vez mais complexos (Cardoso, 2013).

Anais do 9º CIDI e 9º CONGICLuciane Maria Fadel, Carla Spinillo, Anderson Horta,
Cristina Portugal (orgs.)**Sociedade Brasileira de Design da Informação – SBDI**

Belo Horizonte | Brasil | 2019

ISBN 978-85-212-1728-2

Proceedings of the 9th CIDI and 9th CONGICLuciane Maria Fadel, Carla Spinillo, Anderson Horta,
Cristina Portugal (orgs.)**Sociedade Brasileira de Design da Informação – SBDI**

Belo Horizonte | Brazil | 2019

ISBN 978-85-212-1728-2

Devido à investigação das tecnologias de prototipagem rápida aditiva e subtrativa, verifica-se o interesse em novas aplicações de processos que as englobam com parâmetros específicos para determinados fins (Mota, 2011). Desta maneira, cada equipamento tem suas especificidades de produção que podem variar por sua aplicação e fabricante, dificultando a compreensão de informações precisas.

O uso dessas tecnologias tem se tornado cada vez mais facilitado, como observa Lefteri (2008), usuários domésticos serão capazes de fabricar artefatos através de máquinas de impressão 3D ou gravadoras a laser em suas casas ou em FabLabs (Gershenfeld, 2012; Eychenne & Neves, 2013). Contudo, ocorre a falta informação de parâmetros de processos ou de escolha dos equipamentos para a reprodução de determinadas peças, uma vez que cada tecnologia tem sua especialidade inclusive para no que diz respeito à montagem do arquivo. De acordo com Seely (2004), os métodos de preparação via Manufatura Assistida por Computador (CAM), tendem a variar de acordo com os *softwares* de modelagem, fatiamento e de conversão do modelo digital em linguagem de programação que consiga ser interpretada pelos equipamentos.

Nesse contexto, ressalta-se a dificuldade de encontrar publicações científicas que estabeleça parâmetros operacionais confiáveis que auxiliem nos processos de prototipagem rápida com tecnologias aditivas e subtrativas, sendo assim, este artigo tem por objetivo elaborar dados comparativos para o desenvolvimento de produtos considerando duas tecnologias de prototipagem rápida o corte a laser e a impressão 3D.

2 Fundamentação teórica

A fundamentação teórica para o desenvolvimento deste artigo, abordou os conceitos essenciais que definem as tecnologias aqui tratadas através dos seguintes tópicos: a) Tecnologias aditivas; b) Tecnologias subtrativas e; c) Sistema de digitalização óptica 3D.

2.1 Tecnologias aditivas

O surgimento das tecnologias aditivas ocorreu no final da década de 1980. De acordo com Volpato (2017, p. 16), a manufatura aditiva (MA) pode ser definida como um processo de fabricação que ocorre por meio da adição de materiais na forma de camadas, que são obtidas através do processamento de um modelo geométrico tridimensional CAD (*Computer Aided Design*), do projeto a ser executado.

Barbosa (2009, p. 77) define que “o processo de prototipagem rápida é eletrônico-digital-mecânico automatizado que envolve a transformação de algum tipo de material em um peça-produto.” Sendo assim, o processo de desenvolvimento de produtos, inicia com o projeto virtual do que será executado a partir de um software CAD. Segundo Salvan Pagnan e Mottin (2018), através do projeto CAD é possível visualizar o projeto bi e tridimensionalmente, já a tecnologia CAM (*Computer Aided Manufacturing*) possui ferramentas de interpretação e conversão das informações que serão materializadas por equipamentos CNC (*Computer Numerical Control*).

Essas tecnologias constroem os projetos por meio de camadas que após serem produzidos virtualmente, são convertidos em Código G¹ para posteriormente ser produzido em máquinas CNC (Alvarado & Bruscatto, 2009; Jurisato, 2013). Nesta fase de projeto, o modelo CAD tridimensional é “fatiado” eletronicamente para se obter as camadas onde será adicionado material (Volpato, 2017, p.16), conforme demonstrado na Figura 01.

¹ Linguagem de programação utilizada para comandar máquinas CNC.

Anais do 9º Congresso Internacional de Design da Informação | CIDI 2019

Proceedings of the 9th Information Design International Conference

Anais do 9º Congresso Nacional de Iniciação Científica em Design da Informação | CONGIC 2019

Proceedings of the 9th Information Design Student Conference

Figura 01: Etapas do processo de manufatura aditiva (usado com a permissão de Volpato). Fonte: Volpato (2017, p. 17)



As tecnologias aditivas de prototipagem rápida estão sendo cada vez mais utilizadas e seu uso tem sido disseminado pelas indústrias, universidades e inclusive para a fabricação pessoal, devido a facilidade de acesso e popularização das tecnologias por meio de espaços como os *FabLabs*² (Gershenfeld, 2012; Eychenne & Neves, 2013).

2.2 Tecnologias subtrativas

As tecnologias subtrativas são caracterizadas basicamente pela remoção de material para a obtenção do produto desejado e são muito utilizadas no processo de desenvolvimento de produtos. O Corte a Laser é uma dessas tecnologias subtrativas que vem emergindo e popularizando-se com o decorrer dos anos, foi considerada uma das grandes descobertas do século XX (Raseira, 2013).

De acordo com Bagnato (2008, p. 9) o LASER (*Light Amplified by Stimulated Emission Radiation*) desde a sua descoberta, tem sido utilizado nas mais diversas áreas do conhecimento científico, sendo um instrumento de alta precisão criando diversas possibilidades de aplicação.

Segundo Raseira (2013, p. 48),

o processamento a laser acontece por meio de uma transferência controlada de energia, condicionada e intermediada pela incidência do feixe e por sua absorção na superfície da peça trabalhada. As características dos efeitos causados pela radiação a laser na peça dependem, portanto, das propriedades do material de que ela é feita, da intensidade do feixe de laser e do tempo de interação entre eles.

As máquinas de corte a laser possuem três eixos X, Y e Z que possibilitam a regulação de alturas para poder atender projetos com espessuras variadas. Esses equipamentos emitem um raio a laser podendo variar a potência de acordo com a capacidade do tubo de CO₂ (Dióxido de Carbono), dimensões do equipamento, materiais a serem cortados, espessuras, dentre outros (Silva & Barata, 2019).

O equipamento de corte a laser desempenha um importante papel no contexto atual, onde seu uso tem se tornado cada vez mais acessível. Lesko (2012) afirma que a redução do tempo de execução de um produto é muito benéfica perante as condições competitivas do mercado. Novos processos e materiais podem ser inspiradores para os designers, pois além de diminuir as restrições dos processos convencionais, permite ao designer projetar com maior liberdade (Ashby & Johnson, 2011).

A utilização desses tipos de equipamentos de prototipagem rápida e fabricação digital no desenvolvimento de produtos proporcionam aos designers maiores possibilidades de atuação em diferentes níveis de projetos e segmentos. O corte a laser em específico, contribui com a agilidade do processo devido a facilidade em se obter o projeto CAD executivo, que pode ser feito em diversos softwares vetoriais, a precisão de corte, detalhamento e rapidez no processo produtivo também são pontos a serem considerados (Piccoli, Pacheco & Brandi, 2018).

² Laboratórios de Prototipagem Rápida e Fabricação Digital (<http://fablablivresp.art.br/o-que-e>).

Anais do 9º Congresso Internacional de Design da Informação | CIDI 2019

Proceedings of the 9th Information Design International Conference

Anais do 9º Congresso Nacional de Iniciação Científica em Design da Informação | CONGIC 2019

Proceedings of the 9th Information Design Student Conference

2.3 Sistema de digitalização óptica 3D

O sistema de digitalização 3D óptica permite a obtenção de dados tridimensionais de um objeto com agilidade e precisão de maneira a contribuir no processo de desenvolvimento de produtos por se tratar de um sistema monitorado (Cadep, 2013b). De acordo com Silva (2006) através desse tipo de digitalização de objetos é possível obter detalhes de superfícies com maior precisão e de maneira ampla.

Segundo Silva e Rodrigues (2014) através desse equipamento é possível um conjunto de pontos que resultam em uma malha poligonal, podendo ser aplicada em controle de qualidade, engenharia reversa, serviços de inspeção tridimensional, prototipagem e manufatura rápida. Com base nesta nuvem de pontos resultante é processado e obtida a modelagem tridimensional (Calegari *et al.*, 2017), que pode ser comparada com ao processo do CAD referente à um projeto desenvolvido através de um programa de modelamento tridimensional.

Na digitalização tridimensional, além da reprodução da superfície de uma peça, é possível analisar outras grandezas como ângulos e dimensões e a geração de relatórios de desvios existentes, que comumente é realizado por meio de inspeções tridimensionais (Silva & Rodrigues, 2014; Nishimura, *et al.* 2016).

Este estudo propõe realizar uma análise que, sem esse tipo de instrumento de precisão, não seria possível mensurar em valores os erros e imprecisões dimensionais da peça. Assim, estudos sobre o tempo, custos de fabricação, materiais utilizados e outras variáveis foram consideradas e a partir da digitalização tridimensional, buscando realizar uma análise comparativa de fidelidade das peças produzidas nos processos de manufatura aditiva e subtrativa com o arquivo modelado em CAD.

3 Metodologia

Com o objetivo de analisar e avaliar os processos de prototipagem rápida aditiva e subtrativa para o desenvolvimento de produtos, este trabalho realiza uma comparação entre a superfície de projetos desenvolvidos em ambas tecnologias de modo a aferir fidelidade do protótipo físico em relação ao projeto CAD. Para isso, foi adotado o método indutivo, de natureza aplicada, com abordagem quanti-qualitativa (Lakatos & Marconi, 2019; Prodanov & Freitas, 2013; Gil, 2002). Para a obtenção das análises comparativas entre as tecnologias de prototipagem rápida aditiva e subtrativa, foram utilizados os equipamentos do Laboratório Didático de Materiais e Protótipos – LDMP e do Centro Avançado de Desenvolvidos de Produtos - CADEP³, associado ao curso de Design da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação - FAAC⁴, UNESP de Bauru. O laboratório configura-se como um centro multi e transdisciplinar voltado à prestação de serviços à indústria, à comunidade, aos alunos e docentes, que possui tecnologias de prototipagem rápida e convencional (Cadep, 2013a).

Para a realização dos experimentos, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- **Cortadora a laser⁵:** equipamento de corte a laser CO₂, do tipo *plotter* com 80 watts de potência. Modelo Duplojet 1080 - Duplo J⁶. usando o software próprio do equipamento LaserCAD V6.89. Consumo nominal de 3,327 kW/h;
- **Impressora 3D:** equipamento de impressão 3D em filamento, do tipo Cartesiana XY, mesa aquecida e chassi fechado. Modelo Mega Builder II - Mousta⁷. Consumo nominal de 0,360 kW/h;
- **Scanner 3D:** equipamento de digitalização 3D de 2 milhões de ponto por tomada, usando software de inspeção paramétrica através da metrologia óptica. Modelo ATOS 2M - Gom⁸;

³ <http://www.cadepunesp.com.br/>

⁴ <https://www.faac.unesp.br/>

⁵ A cortadora laser utilizada para a pesquisa foi de uso pessoal de um dos pesquisadores deste trabalho

⁶ <http://www.duploj.com.br/>

⁷ <https://www.mousta.com.br/>

Anais do 9º Congresso Internacional de Design da Informação | CIDI 2019

Proceedings of the 9th Information Design International Conference

Anais do 9º Congresso Nacional de Iniciação Científica em Design da Informação | CONGIC 2019

Proceedings of the 9th Information Design Student Conference

Para a aplicação dos testes nos equipamentos, foram selecionados três elementos geométricos puros sendo: um Cubo de 50mm; uma Pirâmide de base quadrada de 50mm e uma Esfera com diâmetro de 50mm, utilizando o mesmo modelo digital como base para os projetos para os dois tipos de maquinário. Para efeitos de análise os modelos foram produzidos considerando os materiais específicos para cada tipo de equipamento onde, para a cortadora a laser, foi utilizado uma chapa de MDF (*medium density fiberboard*) de 3mm de espessura e, para a impressora 3D, um rolo de filamento poli ácido láctico (PLA - 25%) de madeira (75%) com diâmetro de 1.75mm.

Visando compreender os aspectos técnicos e comparativos dos processos para cada modelo especificado, foram definidas quatro variáveis principais sendo: a) Processo produtivo; b) Configurações do Projeto; c) Características dos modelos e; d) Fidelidade dimensional; e dentro de cada variável foi especificado os itens que foram analisados, conforme demonstrado no Quadro 01.

Quadro 01: Variáveis da pesquisa

Equipamento	Produção	Configurações de Projeto	Características dos modelos	Inspeção 3D
Cortadora a Laser	Tempo;	Velocidade; Potência; Número de passadas;	Massa; Custo; Consumo energético;	Fidelidade da peça ao projeto CAD;
Impressora 3D	Tempo;	Velocidade; Espessura de camada; Preenchimento;	Massa; Custo; Consumo energético;	Fidelidade da peça ao projeto CAD;

Os dados das configurações de projeto e o tempo de produção são informados através de ferramentas dos softwares. Para o peso, utilizou-se uma balança com precisão de 0,1g, enquanto o consumo energético foi avaliado pela relação de tempo com o consumo nominal da máquina em Watts considerando os valores da Tarifa de Energia TE (R\$/kWh) Classe B1⁹ Residencial (uma vez que são equipamentos caseiros) - R\$ 0,25588. O custo do projeto é a união do valor energético com o volume de material, desconsiderando fatores de depreciação do equipamento ou hora homem, uma vez que dependem do preço inicial da máquina e de fatores específicos das empresas. Por fim, a fidelidade da peça ao projeto CAD foi entregue através do software de inspeção 3D.

4 Resultados

Considerando que os modelos digitais fossem os mesmos durante a etapa de modelagem CAD, o software Fusion 360 da Autodesk¹⁰ foi usado para gerar as malhas poligonais. Contudo, para a conversão dos modelos para código G, habilitando o processo CAM, as peças foram digitalmente fatiadas através de ferramentas de preparação para cada tipo de máquina.

Para a fabricação à laser, peças com geometrias curvas ou que sofrem alterações como por exemplo a inclinação das faces da pirâmide, não são possíveis de serem produzidas de maneira automática, uma vez que os cortes executados pela máquina são apenas passantes e com angulação de 90 graus com a superfície. Desta forma, algumas técnicas podem ser aplicadas para construir essas geometrias, na qual foi escolhido o uso da técnica *Stacked*¹¹, onde ocorre um empilhamento de chapas através de cola. Esse empilhamento recorre um recurso digital de maneira a dividir as geometrias em linhas de 3mm (considerando a espessura do MDF). No caso da impressão 3D, a divisão das camadas e a preparação é automática.

⁸ <https://www.gom.com/>

⁹ <https://www.enelistribuicaoosp.com.br/para-sua-casa/tarifa-de-energia-eletrica>

¹⁰ <https://www.autodesk.com.br/>

¹¹ Termo em inglês para empilhamento.

Anais do 9º Congresso Internacional de Design da Informação | CIDI 2019

Proceedings of the 9th Information Design International Conference

Anais do 9º Congresso Nacional de Iniciação Científica em Design da Informação | CONGIC 2019

Proceedings of the 9th Information Design Student Conference

Figura 02: Peças geométricas fabricadas através da prototipagem rápida. À esquerda, feitas à laser através do método *Stacked* e, à direita, feitas em impressão 3D por filamento. Fonte: Os autores, 2019.



Após a preparação digital, as peças foram fabricadas através de parâmetros indicados nas Tabelas 01 e 02, obtendo resultados de tempo, consumo energético e custo. Com as geometrias já concluídas, o processo de digitalização 3D através do scanner foi executado com auxílio de pó revelador (devido a superfície escura das peças). Com os modelos digitais reais, a etapa de inspeção 3D foi executada através do software *freeware* Gom Inspect, de maneira a ressaltar os maiores valores de variações na fidelidade da peça em relação ao projeto original CAD.

Tabela 01: Parâmetros técnicos utilizados nas peças de corte a laser

Cortadora a laser	Cubo	Pirâmide	Esfera
Tempo (min e seg)	2 min 55 seg	1 min 35 seg	1 min 57 seg
Velocidade (mm/s)	20mm/s	20mm/s	20mm/s
Potência (W) %	Pot. máx. 80% Pot. mín. 75%	Pot. máx. 80% Pot. mín. 75%	Pot. máx. 80% Pot. mín. 75%
Número de passadas	1	1	1
Quantidade de camadas (cada camada possui 3mm de espessura)	17 pçs	17 pçs	17 pçs
Massa (g)	113,3g	41,5g	64,7g
Consumo energético (kW)	0,162 kW	0,087 kW	0,108 kW
Custo do consumo energético	R\$ 0,04138	R\$ 0,02245	R\$ 0,02766
Consumo de matéria prima - 1 peça (m ²)	0,051562	0,01898	0,010488
Custo do consumo de matéria prima	R\$ 0,38	R\$ 0,14	R\$ 0,77
Custo básico total (consumo energético + consumo de matéria prima)	R\$ 0,421	R\$ 0,162	R\$ 0,797

Para obter uma uniformidade nos resultados, os parâmetros utilizados para a confecção das peças do corte a laser foram os mesmos nas seguintes variáveis: velocidade de corte de 20 mm/s, potência mínima com 75% e máxima 80% e o número de passadas, a quantidade de camadas foi definida a partir da espessura do MDF de 3mm, para atingir a altura desejada utilizou-se 17 peças para cada elemento geométrico, devido à essa limitação, todas as peças cortadas a laser tiveram o aumento de 1mm na altura total do projeto, ficando com 51mm. A distância focal entre o bocal de corte e a superfície do MDF foi de 6 mm. Quanto ao fator de consumo da matéria prima, destaca-se que a placa de MDF utilizada custou o valor de R\$ 37,00 nas dimensões de 2,75 x 1,83m.

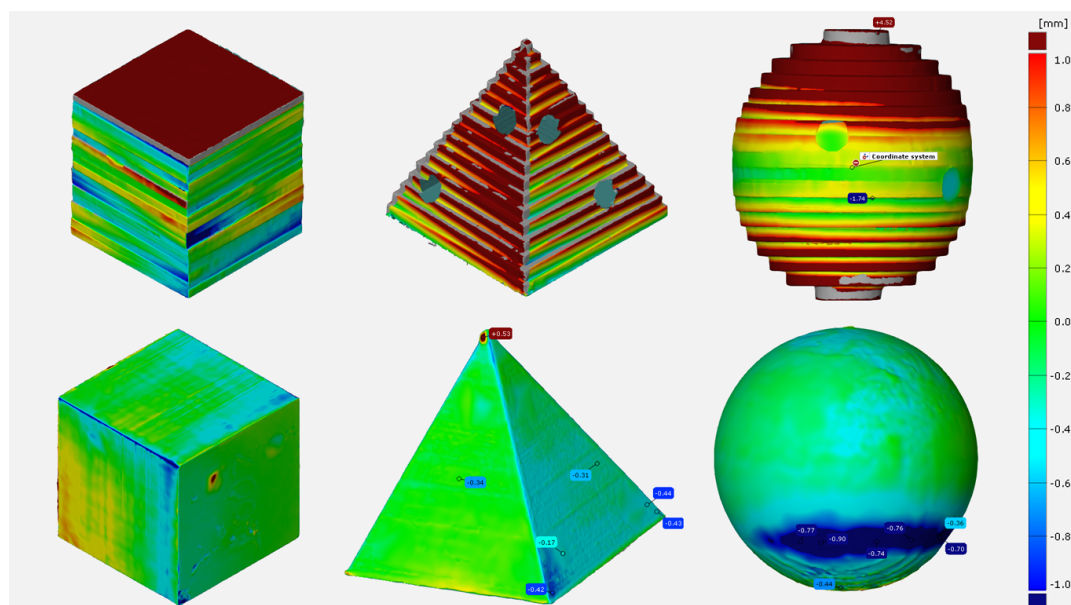
Tabela 02: Parâmetros técnicos utilizados nas peças impressas 3D

Impressora 3D	Cubo	Pirâmide	Esfera
Tempo (hora e min)	2h19min	1h06min	1h18min
Velocidade (mm/s)	50mm/s	50mm/s	50mm/s
Preenchimento %	10%	10%	10%
Temperatura do bico (°C)	200° C	200° C	200° C
Espessura da camada (mm)	0,2 mm	0,2 mm	0,2 mm
Massa (g)	38,7g	10,9g	20,9g
Consumo energético (kWh)	0,834 kW	0,396 kW	0,468 Watts
Custo do consumo energético	R\$ 0,21340	R\$ 0,10132	R\$ 0,11975
Custo do consumo de matéria prima	R\$ 5,03	R\$ 1,41	R\$ 2,71
Custo básico total (consumo energético + consumo de matéria prima)	R\$ 5,243	R\$ 1,511	R\$ 2,829

Da mesma maneira, para obter uma uniformidade nos resultados, os parâmetros utilizados para a confecção foram os mesmos nas seguintes variáveis: velocidade de impressão de 50 mm/s, temperatura do bico de 200° C e o preenchimento interno. Em quesito de suporte, apenas a peça esférica requisitou, onde toda a superfície com ângulo maior de 60° foi afetada. Quanto ao fator de consumo da matéria prima, destaca-se que o rolo do filamento é vendido por R\$ 130,00 o quilo (sendo a mesma medida da massa das peças), enquanto o MDF é por área e espessura no caso da cortadora laser.

Concluída a etapa de fabricação e digitalização tridimensional, a malha poligonal foi posta sobre o modelo CAD a partir do centro das peças, permitindo a inspeção em ambiente virtual. Os dados gerados pela inspeção demonstram uma maior precisão das peças impressas em filamento, havendo picos de desvio menores em cada forma em relação ao laser. Além disso, a média de erros, conforme é visto na Figura 03 através do mapa de cores, é bem menor nas peças impressas.

Figura 03: Inspeção geral das peças digitalizadas. Em cima, as geometrias cortadas à laser e, embaixo, as impressas em filamento. Fonte: Os autores, 2019.



Na Figura 03 é possível observar, com auxílio da legenda à direita, a precisão das peças, onde as cores vermelhas indicam excesso de material, azuis recesso e, verdes, volumes precisos.

No caso dos cubos, destaca-se um excesso de material ao topo da peça feita na laser (uma vez que 50mm não é possível atingir empilhando chapas de 3mm) e variações dimensionais nas laterais causadas pelo processo de cola, enquanto a peça impressa tem apenas um problema nas arestas onde ocorre um arredondamento e, conseqüentemente, perda de material.

Nas pirâmides, o método *stacked* excede as dimensões do CAD por não haver chanfros no processo a laser, ao mesmo tempo que, em filamento, é percebido uma perda de material nas arestas e um excesso no topo (devido a limitação do bico extrusor, uma vez que a espessura do material aplicado não atinge final em 0). Por fim, no processo das esferas ocorre o mesmo problema da pirâmide no laser, onde a falta de chanfros e arredondamentos causam um excesso de material, em contrapartida a peça impressa possui uma rugosidade em sua base devido o posicionamento do suporte e uma perda de material por possíveis erros de alinhamento da mesa ou pela falta de suporte.

Tabela 3: Parâmetros técnicos da inspeção tridimensional das peças de corte a laser

Cortadora a laser	Cubo	Pirâmide	Esfera
Inspeção 3D	Desvio máximo de 2,57 e mínimo de -1,04mm	Desvio máximo de 2,84 e mínimo de -3,15mm	Desvio máximo de 4,52 e mínimo de -1,74mm

Além do mapa de cores, é possível extrair informações em números dos desvios máximos e mínimos encontrados na digitalização. No cubo, o desvio máximo ocorre na chapa superior e o mínimo devido a erros no processo de cola. Na pirâmide, ambos estão envolvidos com processo de cola e a falta de chanfro. Na esfera, processo de cola e falta de arredondamentos.

Tabela 4: Parâmetros técnicos da inspeção tridimensional das peças impressas 3D

Impressora 3D	Cubo	Pirâmide	Esfera
Inspeção 3D	Desvio máximo de 0,28 e mínimo de -0,33mm	Desvio máximo de 0,55 e mínimo de -0,55mm	Desvio máximo de 0,48 e mínimo de -0,77mm

No caso das peças impressas, o cubo sofre por impossibilidade de fabricar ângulos retos. Na pirâmide, pelo mesmo problema somado ao erro da ponta superior. Na esfera, pela presença/ausência do suporte.

5 Discussões

Os valores encontrados e apresentados nas tabelas e na inspeção tridimensional mostram uma diferença clara das duas tecnologias quando aplicadas à produção dessas peças. Destacam-se essas diferenças nos seguintes itens:

- Processo produtivo:
 - Tempo de produção: a velocidade do corte a laser é superior ao da impressão por filamento, visto que economizou 136 (4760%), 64 (4177%) e 76 (4000%) minutos de fabricação no cubo, pirâmide e esfera (respectivamente). Contudo, destaca-se de que o método *stacked* do corte a laser requer que as peças sejam empilhadas através de uma cola que, apesar de não mensurada por envolver mão de obra humana (que pode variar de operador), deve ser considerada durante o projeto;
- Configurações do projeto: embora tenha sido utilizado o mesmo modelo virtual nos dois tipos de tecnologias, é importante destacar que, por se tratar de equipamentos distintos, cada um possui suas particularidades de preparo de arquivo e de configurações dos softwares para confecção das peças;
- Características dos modelos: foi definido que seria analisado a massa, o custo e consumo de material e o consumo energético.

- Massa: Quanto à massa das peças, uma vez que as peças feitas a laser são maciças, seu peso é maior do que as fabricadas em filamento, medindo 75 (293%), 31 (381%) e 44 (310%) gramas a mais do que as impressas em 3D no cubo, pirâmide e esfera (respectivamente);
- Custo de matéria prima: sobre o custo e consumo de matéria prima para a confecção dos modelos em cada tecnologia, destaca-se que o filamento da impressão 3D sai R\$ 4,65 (1324%), R\$ 1,27 (1007%) e R\$ 1,94 (352%) mais caro do que as chapas de MDF do corte a laser em referência ao cubo, pirâmide e esfera (respectivamente);
- Consumo Energético: Já em relação ao consumo energético, a cortadora a laser consegue economizar 0,672 (514%), 0,309 (455%) e 0,360 (433%) kW em relação à impressora 3D, representando, em reais, R\$ 0,17, R\$ 0,08 e R\$ 0,10 referente ao cubo, pirâmide e esfera (respectivamente);
- Fidelidade dimensional: considerando apenas os picos de desvio máximo e mínimo de cada peça indicados pelo software, o cubo da impressão 3D se apresenta mais preciso em 918% nos desvios máximos e 315% nos mínimos. A pirâmide da impressão 3D se apresenta mais precisa em 516% nos desvios máximos e 573% nos mínimos. A esfera da impressão 3D se apresenta mais precisa em 942% nos desvios máximos e 226% nos mínimos.

6 Considerações finais

Através das análises realizadas, foi possível atingir os objetivos propostos neste estudo, de maneira a estabelecer parâmetros operacionais em relação ao uso das tecnologias de impressão por filamento e corte à laser e a comparação das mesmas por meio da digitalização tridimensional envolvendo inspeção de superfície.

A análise do uso dessas tecnologias para o desenvolvimento de produtos revelou que ambas as tecnologias possuem vantagens e desvantagens dentro do processo de prototipagem, sendo assim, existe ainda uma carência na literatura de pesquisas que forneçam parâmetros confiáveis e que informe ou oriente qual é o equipamento mais adequado para determinados projetos, entendendo que cada tecnologia possui uma especificidade.

Quanto ao uso da metrologia óptica para a realização da inspeção das peças, mostrou-se extremamente eficaz, fornecendo dados que sem esse tipo de equipamento, seria muito difíceis de serem obtidos. Essa análise tridimensional por meio de digitalização 3D permitiu avaliar a superfície das peças e compará-las com o modelo digital CAD, o que demonstrou ser uma ferramenta relevante para esse tipo de análise aqui apresentada.

Por fim, ressalta-se que esta pesquisa se limitou ao uso de apenas dois tipos de tecnologias e materiais, sem considerar outras variações dos equipamentos, espessuras e composições de materiais para traçar a análise comparativa apresentada. Contudo, o uso de apenas dois equipamentos e materiais, permitiu obter dados que a literatura carece.

Sendo assim, percebe-se que a partir das análises comparativas geradas pela pesquisa encontram-se em estágio inicial, abrindo um campo de possibilidades para estudos futuros, testando outros formatos geométricos, materiais, tipos de equipamentos que podem ser associados a análises mais acuradas por meio do sistema de metrologia óptica da digitalização 3D.

Agradecimento

Os autores agradecem ao Laboratório Didático de Materiais e Protótipos – LDMP e ao Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos - CADEP por ceder o espaço para a realização da pesquisa e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil) e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro da pesquisa (respectivamente, processos n.º 88887.319160/2019-00 e 2018/01213-1).

Referências

- Alvarado, Rodrigo García., Lagos, Pedro Salcedo & Bruscato, Underlea. (2009). Evaluación de Experiencias de Fabricación Digital en la Enseñanza de Arquitectura. In: International Conference ICBL, 3, 2009, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC.
- Ashby, Michael & Johnson, Kara. (2011). Materiais e Design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto. 2.ed. Rio de Janeiro: Elsevier. p. 341.
- Bagnato, Vanderlei Salvador. (2008). Laser: e suas aplicações em Ciência e Tecnologia. São Paulo: Editora Livraria da Física.
- Barbosa, Ricardo Tiradentes. (2009). Design e Prototipagem: conhecimento e uso da prototipagem rápida no design brasileiro. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado em Design) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação, Bauru, SP.
- Cadep. [2013?a]. Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos. São Paulo, mai. Recuperado 24 de maio de 2019, <http://www.cadepunesp.com.br/>.
- Cadep. [2013?b]. Sistema ótico de digitalização 3D móvel GOM Atos | 2M. São Paulo, mai. Recuperado 24 de maio de 2019, <http://www.cadepunesp.com.br/p/3datos.html>.
- Calegari, Eliana Paula *et al.* (2017). A digitalização tridimensional como método de verificação da deformação do MDF ocasionada pela absorção de água. Revista DAPesquisa, Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Centro de Artes - CEART, Florianópolis, SC, v.12, n.18, p.14 - 29, abril 2017.
- Cardoso, Rafael. (2013). Design para um mundo complexo. São Paulo: Cosac Naify.
- Eychenne, Fabien & Neves, Heloisa. (2013). Fab Lab: A Vanguarda da Nova Revolução Industrial. São Paulo: Fab Lab Brasil.
- Gershenfeld, Neil. (2012). How to Make Almost Anything: The Digital Fabrication Revolution. Foreign Affairs, Tampa, nov.-dez. 2012.
- Gil, Antonio Carlos. (2002). Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas.
- Jurisato, Augusto Seolin., Rocha, Marcelo Ricardo., Hellmeister, Luis Antonio Vasques., Marar, João Fernando & Sementille, Antônio Carlos. (2013). Difusão de tecnologia CAD e CNC como ferramenta básica de criação de produção em pequena escala, acessível à comunidade. Congresso de Extensão Universitária 7., 2013, Águas de Lindóia. Anais... São Paulo: PROEX;
- Lakatos, Eva Maria & Marconi, Marina de Andrade. (2019). Fundamentos de metodologia científica. 8. ed. São Paulo: Atlas.
- Lefteri, Chris. (2008). Así se hace: técnicas de fabricación para diseño de producto. Barcelona, Blume.
- Lesko, Jim. (2012). Design Industrial: Guia de Materiais e Fabricação. 2. ed. São Paulo: Blucher. p. 338-340.

- Mota, Catarina. (2011). The Rise of Personal Fabrication. In: Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition, 2011, Lisboa. Anais... Lisboa, 2011, p. 279-288. Recuperado 30 de maio de 2019, <http://doi.acm.org/10.1145/2069618.2069665>.
- Nishimura, Paula Lumi Goulart., Rodrigues, Osmar Vicente., Botura Júnior, Galdenoro., Silva, Letícia Alcará da. (2016). Prototipagem rápida: um comparativo entre uma tecnologia aditiva e uma subtrativa., p. 4481-4491. In: Anais do 12º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design [= Blucher Design Proceedings, v. 9, n. 2]. São Paulo: Blucher.
- Piccoli, Mariana., Pacheco, Joyson & Brandi, Leonardo Barili. (2018). Caracterização e definição de parâmetros de corte a laser em tubos de papelão: possibilidades de aplicação no design de produtos. Trabalho apresentado em Anais do Congresso Internacional e Workshop Design & Materiais.
- Prodanov, Cleber Cristiano & Freitas, Ernani César de. (2013). Metodologia do Trabalho Científico [recurso eletrônico]: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale.
- Raseira, Cristine Bassols. (2013). Design e Tecnologia aplicados a Resíduos de Madeira: Especificações para o Processo de Corte a Laser em Marchetaria. Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre, BR-RS.
- Salvan Pagnan, Caroline & Mottin, Artur Caron. (2018). Cuad. Cent. Estud. Diseñ. Comun., Ensayos, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, n. 69, p. 1-6, sept. Recuperado 10 de junho de 2019, http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1853-35232018000400009&lng=es&nrm=iso
- Seely, Jennifer C.K. (2004). Digital Fabrication in the Architectural Design process. Dissertação (Mestrado) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2004.
- Silva, Conrado Renan da & Barata, Tomás Queiroz Ferreira. (2019). Análise da inserção das tecnologias de prototipagem e fabricação digital nos cursos de Design de duas IES do estado de São Paulo., p. 990-1004. In: Anais do 13º Congresso Pesquisa e Desenvolvimento em Design (2018). São Paulo: Blucher.
- Silva, Fábio Pinto da. (2006). O uso da Digitalização Tridimensional a Laser no Desenvolvimento e Caracterização de Texturas Aplicadas ao Design de Produtos. Dissertação de Mestrado. PPGEM, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Silva, Letícia Alcará da., Rodrigues, Osmar Vicente. (2014). A digitalização ótica tridimensional no desenvolvimento de próteses. Anais do 11º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design [= Blucher Design Proceedings, v. 1, n. 4]. São Paulo: Blucher.
- Volpato, Neri. (2017). Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher

Sobre os autores

Conrado Renan da Silva, Mestrando em Design, FAAC-UNESP-Universidade Estadual Paulista, Brasil, <conrado.crsilva@gmail.com>

Raul Molina Jeronymo, Graduando em Design, FAAC-UNESP-Universidade Estadual Paulista, Brasil, <raul.molina.j@gmail.com>

Tomás Queiroz Ferreira Barata, Doutor, FAAC-UNESP-Universidade Estadual Paulista, <tomas.barata@unesp.br>