

325

Design & Narrativas criativas
nos Processos de Prototipagem

COMPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE PEÇAS MANUFATURADAS EM IMPRESSÃO 3D ATRAVÉS DA METROLOGIA ÓPTICA

SOBRE OS AUTORES

Raul Molina Jeronymo - raul.molina.j@gmail.com

Designer industrial, graduado em Design pela Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação; UNESP - Universidade Estadual Paulista. Atuou como técnico do laboratório Centro Avançado de Desenvolvimento de Produto. Foi pesquisador FAPESP na área de prototipagem rápida, estagiando na Universidade de Huddersfield - Inglaterra, através do programa de Bolsa de Estágio de Pesquisa no Exterior. Foi cofundador de uma startup tecnológica que promove redução de custos industriais por meio da implementação de tecnologias 3D.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1650348977383075>

Conrado Renan da Silva - conrado.renan@unesp.br

Designer de produtos e Mestre em Design na linha de pesquisa Planejamento de Produto pela Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação; UNESP - Universidade Estadual Paulista. Especialista em Docência do Ensino Técnico e Superior e em Design de Interiores pelo Centro Universitário Toledo. Graduado em Bacharel em Desenho Industrial pela Faculdade de Ciências e Tecnologia de Birigui.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4955600531155386>

Erick Hernan Boschilha Lastra - ericklastra@gmail.com

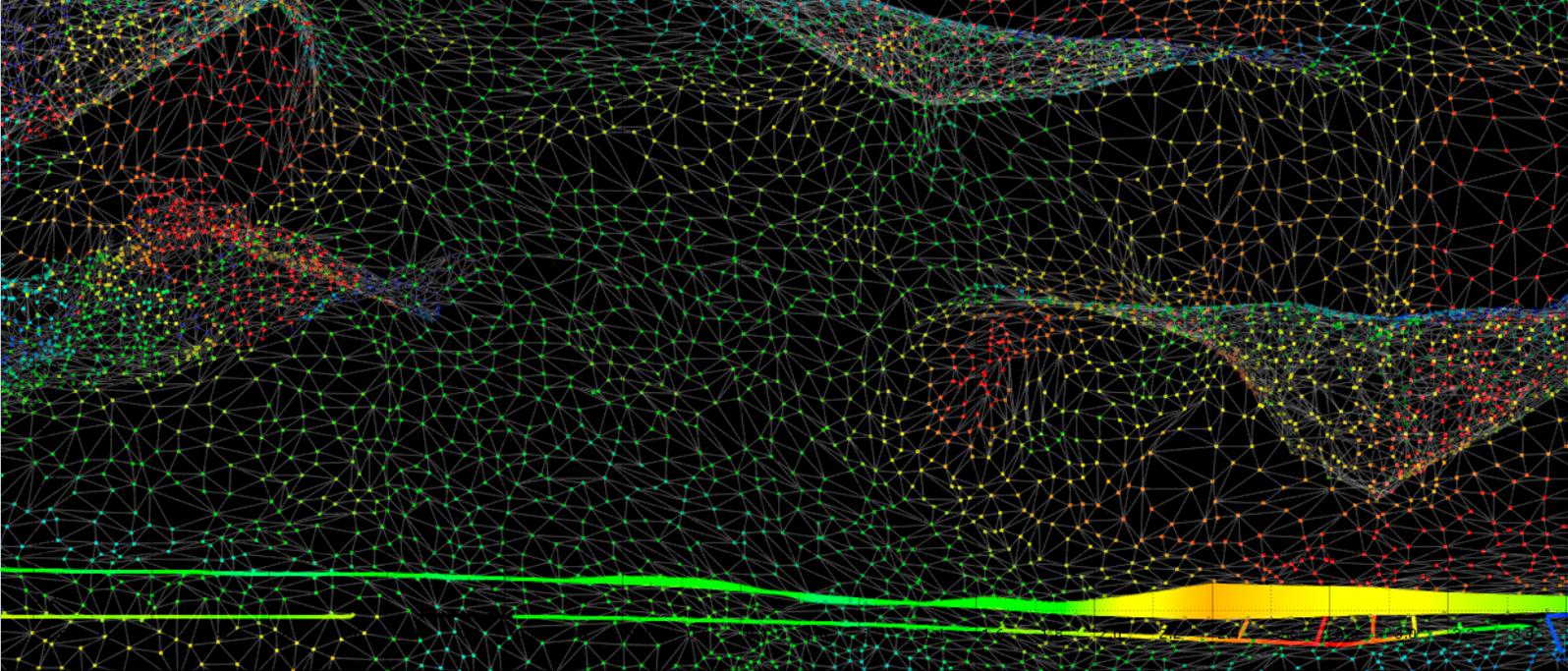
Engenheiro Mecânico e Mestre em Design com ênfase em Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) pela UFPR - Universidade Federal do Paraná. Graduando em Design de Produtos pela FAAC - Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação; UNESP - Universidade Estadual Paulista. Atuou no Centro Avançado de Desenvolvimento de Produto e como Professor de Materiais para Designers em curso particular lecionado em Curitiba/PR. Atualmente é fundador e responsável por uma startup tecnológica que promove redução de custos industriais em linhas de fabricação de bebidas e alimentos por meio da implementação de tecnologias 3D.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9743866153636906>

Tomás Queiroz Ferreira Barata - barata@usp.br

Professor assistente doutor do Departamento de Design da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação; UNESP - Universidade Estadual Paulista. Doutor em Engenharia Civil na área de concentração em arquitetura e construção pela Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas; Mestre em Arquitetura e Urbanismo na área de concentração em tecnologia do ambiente construído pela Universidade de São Paulo e graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de São Paulo. Experiência em projetos de design, arquitetura e engenharia civil, atua no desenvolvimento e produção de mobiliários, equipamentos urbanos, componentes e sistemas construtivos pré-fabricados em madeira e materiais de fontes renováveis e edificações sustentáveis.

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7865768257571169>



COMPARAÇÃO DA SUPERFÍCIE DE PEÇAS MANUFATURADAS EM IMPRESSÃO 3D ATRAVÉS DA METROLOGIA ÓPTICA

*Comparison of a surface of parts manufactured
in 3D printing by using optical metrology*

Raul Molina Jeronymo | Conrado Renan da Silva |
Erick Hernan Boschilha Lastra | Tomás Queiroz Ferreira Barata

Resumo:

Com o objetivo de investigar e discutir processos de manufatura aditiva, o presente capítulo analisa a qualidade superficial de corpos de prova impressos em filamento através da metrologia óptica. Realizado no Centro Avançado de Desenvolvimento de Produto da UNESP de Bauru, o estudo explorou os processos de impressão 3D em relação à qualidade superficial de peças cilíndricas. O desenvolvimento apresenta o processo de manufatura e inspeção das peças, com foco na elaboração de diagramas de comparação para identificar pontos desvios de superfície. Foram identificadas limitações do processo de impressão 3D e constatou-se a relevância da aplicação de metrologia óptica para a análise acurada de superfícies.

Palavras chave: Manufatura Aditiva; Impressão 3D por filamento; Metrologia Óptica; Comparação de superfície;

Abstract:

To investigate additive manufacturing processes, this chapter analyses the surface quality of filament printed specimen parts through optical metrology. Developed in the CADEP facility of the campus of UNESP, Bauru, the study explored the surface quality of cylindrical parts made with the 3D printing process. The research presents the manufacturing and the inspection of the parts, focusing on the elaboration of diagrams to identify deviations on the surface. It was identified limitation of manufacturing with 3D printing, and the understanding of the relevance of optical metrology for accurate analysis in surfaces.

Keywords: 3d printing; Additive Manufacturing; Optical Metrology; Surface Comparison;

1. INTRODUÇÃO

A crescente complexidade dos produtos industrializados associada a elevada concorrência de mercado tem exigido das empresas, novos métodos de desenvolvimento visando a redução de tempo de projeto, aumento na qualidade e na competitividade de seus artefatos (VOLPATO, 2017). Como ferramenta para solucionar essa aplicação, têm-se desenvolvido equipamentos com diversas tecnologias voltadas não apenas para a produção de peças finais, mas também para protótipos. Essas ferramentas se enquadram na categoria de prototipagem rápida, onde destacam-se as impressoras 3D. Contudo, com diversos equipamentos sendo desenvolvidos de maneira conjunta (programação aberta - *open source* e equipamentos abertos - *open hardware*) (MOTA, 2011), existem diversas combinações de parâmetros e configurações que podem ser trabalhadas pelos projetistas.

Dentre as configurações voltadas para o projeto em impressão 3D, destaca-se a capacidade de fabricar mais de uma peça por processo, de maneira a economizar o tempo utilizado, o que, como apontado anteriormente, é um aspecto importante para o atual cenário das indústrias (VOLPATO, 2017). Contudo, a presença de mais de um artefato por impressão pode acarretar em erros de superfície e, até mesmo, inutilizar a peça. Desta forma, este estudo tem por objetivo apontar possíveis estratégias de avaliação dessa irregularidade de superfície para viabilizar o ganho de qualidade na impressão de artefatos e também melhorar o planejamento de projetos que atendam profissionais que utilizam a impressão 3D em seu processo de desenvolvimento de protótipos e produtos.

Para capturar e determinar essas informações de superfície, pretende-se aplicar a metrologia óptica através de um scanner 3D, gerando medições e determinações quantitativas de determinadas características nas impressões tridimensionais, tais como o desenvolvimento de diagramas de comparação entre a peça real e o projeto digital, utilizado como base para a prototipagem rápida. Dessa forma, esse tipo de análise evita concepções subjetivas e incertezas em casos de amostras similares ou que, dependendo da aplicação, determinada característica superficial pode viabilizar ou inviabilizar a aplicação da peça manufaturada.

2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO POR MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva (*Additive Manufacturing - AM*) caracteriza-se pelo processo de fabricação por meio de adição de material em forma de camadas (VOLPATO, 2017, p. 16). Inicialmente esse processo ocorre através de uma representação gráfica tridimensional CAD (*Computer Aided Design*) do projeto a ser executado. Seely (2004) apresenta o conceito de fabricação digital sendo um método empregado no desenvolvimento de projetos utilizando sistemas de modelagem digital como o CAD e ferramentas *Computer Aided Manufacturing (CAM)* para conversão de informações para leitura de máquinas *Computer Numerical Control (CNC)*.

As tecnologias referidas abrangem processos com máquinas que constroem fisicamente esses modelos através de camadas ou planos geométricos usando materiais específicos (ALVARADO e BRUSCATO, 2009). Após o desenvolvimento das peças, é necessário que haja conversão dos valores em Código G, linguagem de programação utilizada para comandar máquinas CNC (JURISATO, 2013).

Nesta etapa o projeto é fatiado em *software* eletrônico onde se obtêm as curvas de níveis 2D que determinarão para cada camada onde terá ou não material a ser adicionado. Posteriormente, a peça física é gerada por meio do empilhamento sequencial das camadas e da adesão das mesmas, esse processo ocorre da base do projeto ao topo (VOLPATO, 2017, p.16). Os sistemas aditivos consistem então em solidificar ou depositar a matéria prima em camadas, podendo realizar formas tridimensionais complexas (BARROS, 2011), conforme demonstrado na Figura 1.

| | | | |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |
| Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD) | Planejamento de processo (fatiamento) | Processamento por adição das camadas | Peça fabricada |
| Modelo eletrônico 3D | | Modelo físico | |

Quanto à definição e escolha do equipamento a ser utilizado para o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) na AM, depende unicamente da finalidade do projeto a ser executado assim como as máquinas de subtração, para cada finalidade existem modelos diferentes, variando desde tamanhos até temperatura de funcionamento. De acordo com Volpato (2017, p. 24) as tecnologias AM podem ser classificadas de acordo com o princípio de processamento das camadas (Tabela 1).

Figura 1: Representação das etapas do processo de manufatura aditiva.
 Fonte: Volpato (2017, p. 17)

| CLASSIFICAÇÃO DAS TECNOLOGIAS AM | DESCRIÇÃO DOS PRINCÍPIOS | ALGUMAS TECNOLOGIAS NA CATEGORIA |
|----------------------------------|--|--|
| Fotopolimerização em cuba | Polímero fotossensível líquido é curado seletivamente em uma cuba por polimerização ativada por luz. | Estereolitografia, produção contínua com interface líquida, outros |
| Extrusão de material | Material é extrudado através de um bico ou orifício, sendo seletivamente depositado. | Modelagem por fusão e deposição, outros |
| Jateamento de Material | Material é depositado em pequenas gotas de forma seletiva | PolyJet, impressão por múltiplos jatos, outros |

| | | |
|-----------------------------------|---|---|
| Jateamento de aglutinante | Um agente aglutinante líquido é seletivamente depositado para unir em pó | Impressão colorida por jato, outros |
| Fusão de leito de pó | Energia térmica funde seletivamente regiões de um leito de pó | Sinterização seletiva a laser, sinterização direta de metal a laser, fusão seletiva a laser, LaserCUSING, fusão por feixe de elétrons, outros |
| Adição de lâminas | Lâminas recortadas de material são unidas (coladas) para formar um objeto | Manufatura laminar de objetos, tecnologia da Solido, deposição seletiva de laminados, outros |
| Deposição com energia direcionada | Energia térmica é usada para fundir materiais à medida que eles são depositados | Forma final obtida com laser, deposição direta de metal, revestimento a laser tridimensional, outros |

Tabela 1: Classificação das tecnologias de AM. Fonte: Adaptado de Volpato (2017, p. 24)

Entre os tipos de classificação das tecnologias de prototipagem rápida apresentadas por Volpato (2007, p.56), ressalta-se a Modelagem por Fusão e Deposição - FDM (*Fused Deposition Modeling*), por ser o tipo de tecnologia mais acessível e comumente utilizada em ambientes como os Laboratórios de Fabricação Digital (*Fab Labs*), que tem facilitado o acesso à essas tecnologias pelas pessoas (GERSHENFELD, 2012; EYCHENNE e NEVES, 2013). A prototipagem rápida vem ocupando cada vez mais espaço e possibilitado aos designers o desenvolvimento e apresentação de protótipos físicos (VOLPATO, 2017, p. 36).

1 <https://www.thingiverse.com/>

3. PROCESSO DE FABRICAÇÃO COM FILAMENTO FUNDIDO

A fabricação com filamento fundido ocorre pelo processo AM para a prototipagem rápida, o FDM, que após a sua popularização e quebra de patente passa a ser denominada FFF (*Fused Filament Fabrication*), tornando-se mais acessível aos designers pela maior quantidade de produtores desse tipo de máquina.

Como afirma Mota (2011), a popularização das máquinas *homemade*, os *FabLabs* e os sites de hospedagem gratuita de modelos digitais como o *Thingiverse*¹ tem contribuído para a produção de peças impressas em filamento. Isso possibilita a confecção de produtos de reposição, *hobby* e aplicações gerais sem a necessidade do fabricante original.

“[...] este processo utiliza filamento de resina termoplástica que são aquecidas e extrudadas para a formação do modelo. O modelo é formado sobre uma base que faz o movimento vertical. Um bico extrusor que se move num plano X-Y vai depositando continuamente um filete de material sobre a base que mantém uma temperatura inferior à do material de forma que a resina termoplástica endurece rapidamente até formar toda a camada [...]” (PEREIRA, 2015, p.79).

As máquinas FFF podem trabalhar com diversos tamanhos de impressão (tendo como limite a área da mesa de suporte) e insumos. Existem modelos com capacidade de manter os materiais aquecidos após sua deposição para melhorar a aderência, o que permite a manufatura com filamentos que exigem temperaturas maiores para serem extrudados, desde compósitos de madeira, termoplástico biodegradáveis até mesmo metais.

4. METROLOGIA ÓPTICA E DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL

A metrologia óptica ocorre por meio de um sistema ótico de digitalização de alta resolução, onde são obtidos dados tridimensionais de um objeto de modo preciso, que além de auxiliar na otimização do processo de desenvolvimento de produtos, contribui também com a melhoria do *workflow*² por se tratar de um sistema monitorado (CADEP, 2013b). Através da digitalização tridimensional é possível adquirir detalhes de superfícies de modo preciso (SILVA, 2006).

De acordo com Silva e Rodrigues (2014), com esse tipo de equipamento, é possível se obter cerca de dois milhões de pontos em uma tomada, cada tomada é somada a um conjunto de medições que resultam em uma malha poligonal, podendo ser aplicada na prototipagem rápida. Cabe mencionar que a palavra “tomada” é o processo de um ciclo de captura de imagem por parte do *Scanner* 3D, imagem esta que, posteriormente via *software*, será transformada em dado virtual expressado em um conjunto de pontos, também conhecido como “nuvem de pontos”.

Segundo Calegari *et al.* (2017), o processamento da modelagem tridimensional é obtido com base da nuvem de pontos. É importante que seja realizado uma filtragem dos pontos pelo sistema CAD para reduzir ruídos e tornar o arquivo mais fácil de ser manipulado.

Do mesmo modo, na metrologia óptica essa nuvem de pontos que geram a superfície da malha poligonal do objeto, como descrito por Silva e Rodrigues (2014), pode ser usada para realizar uma comparação com a superfície CAD referente ao projeto modelado visando verificar os desvios existentes entre eles, além de outras variáveis.

Silva *et al.* (2010) em seu trabalho sobre aplicações da digitalização tridimensional em Design de Produtos aponta essa tecnologia como relevante para analisar formas e determinar relações constitutivas de produtos. Para casos de produtos com formas orgânicas, o processo de medição manual se torna altamente complexo. Os dados obtidos através da digitalização em formato de malha tridimensional *Stereolithography* (STL) podem ser comparados com o produto modelado em CAD.

A presente pesquisa se propõe a realizar uma análise difícil de avaliar sem o uso de um instrumento tecnológico de precisão. A qualidade e os detalhes da superfície podem ser imperceptíveis aos sentidos e, mesmo se percebidos, são de difícil medição manual. Assim, para determinar as medidas dos detalhes superficiais das peças a inspeção tridimensional é realizada por meio de *software* específico cuja medição é baseada em sistema óptico.

² Termo inglês que significa fluxo de trabalho

5. MÉTODO DE PESQUISA

Com o objetivo de avaliar a qualidade superficial de artefatos impressos em filamento fundido por meio do uso de equipamento de metrologia óptica, este trabalho realizou a comparação entre a superfície dessas peças de modo a determinar a qualidade da impressão em relação ao modelo tridimensional tido como valores teóricos. O método adotado é indutivo, experimental e de natureza aplicada (LAKATOS; MARCONI, 2019; PRODANOV; FREITAS, 2013; GIL, 2002).

A pesquisa foi realizada no Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos - CADEP³, com sede no Campus de Bauru, ligado ao Departamento de Design da Faculdade de Arquitetura, Artes e Comunicação - FAAC⁴, da UNESP. O laboratório possui diversas tecnologias de prototipagem rápida e convencional, onde são realizadas pesquisas e experimentos, apoiando o trabalho de docentes, alunos e pesquisadores em projetos que envolvam a produção de modelos e protótipos desde os convencionais baseadas na subtração, fundição e conformação de materiais, até os mais modernas baseadas na adição de materiais e escaneamento 3D (CADEP, 2013a).

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

- Impressora 3D: Modelo Builder Mega 2 da empresa Moustas⁵, impressora FFF (*Fused Filament Fabrication*);
- Scanner 3D: Modelo ATOS II 2M da empresa GOM⁶;

Para a realização dos testes, foram desenvolvidos dois modelos virtuais com formato cilíndrico denominados: Geometria Simples e Geometria Complexa (Tabela 2), que foram impressos seguindo os mesmos parâmetros de configurações.

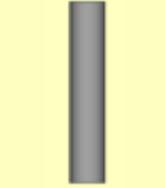
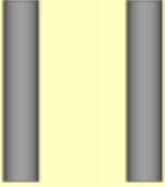
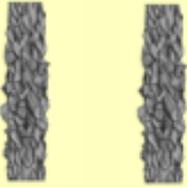
| | GEOMETRIA SIMPLES | GEOMETRIA COMPLEXA |
|-------------------|---|---|
| QTDE. POR ARQUIVO |  |  |
| |  |  |

Tabela 2. Planejamento de impressão de peças para comparação de superfície. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

3 <http://www.cadepunesp.com.br/>

4 <https://www.faac.unesp.br/>

5 <https://www.moustas.com.br/>

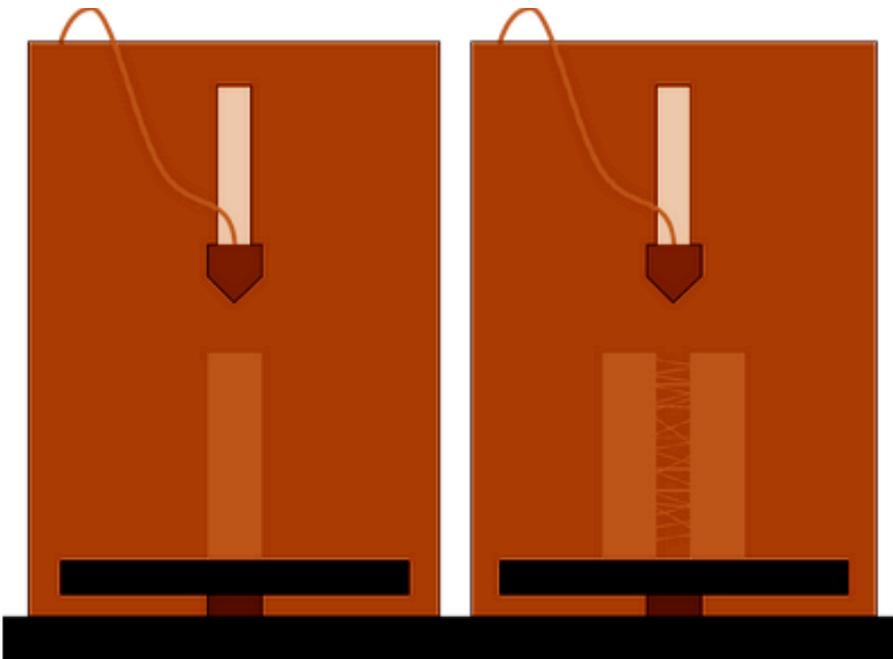
6 <https://www.gom.com/>

Visando entender os aspectos técnicos e produtivos de cada um dos modelos e quantidades listadas, as análises foram realizadas partindo do princípio de que em alguns casos, com o intuito de agilizar o processo produtivo, a produção é feita com diversas peças. Contudo, os parâmetros que habilitam essa velocidade de produção podem interferir na qualidade da superfície da peça, causando *stringings* e uma maior rugosidade superficial (3DLAB, 2019), conforme é visto em um resultado desenvolvido em pesquisas anteriores (Figura 02).



Esse defeito superficial pode ser removido através de processos de acabamento, contudo, em partes que exigem precisão como encaixes podem comprometer o protótipo. Sendo assim, essa limitação do processo deve ser considerada na etapa de projeto.

Figura 02: Peça produzida em manufatura aditiva. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.



De maneira a entender essas limitações e investigar as diferenças da qualidade de impressão com peças únicas em relação à mais de um modelo por arquivo, pretende-se desenvolver dois artefatos distintos em níveis de detalhamento, mantendo os mesmos parâmetros de processo. Em seguida, deve-se imprimir as mesmas peças, mas com mais de um modelo por arquivo.

Figura 03: Ilustração do efeito stringing ocorrido entre duas peças impressas no mesmo arquivo (direita) em comparação com uma peça individual (esquerda). Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

Após a fabricação das peças, elas devem ser digitalizadas através de um scanner 3D e convertidas em arquivo digital, onde deve ocorrer a comparação da fidelidade da malha relação ao CAD ao lado de avaliação da qualidade de superfície, gerando um diagrama com a rugosidade da peça.

Com os mapas de superfície da parte impressa ao lado do diagrama de rugosidade, espera-se encontrar valores que contribuam ao planejamento de operadores e projetistas de processos que envolvam FFF.

6. PROCESSO E RESULTADOS PROJETIVOS

O processo e os resultados projetivos deste estudo abordaram os conceitos relacionados à AM e da digitalização 3D através dos seguintes tópicos: 1) Modelagem digital; 2) Impressão 3D; 3) Inspeção 3D; 3a) Corpo de Prova - Geometria Simples e; 3b) Corpo de Prova - Geometria com Superfície Complexa.

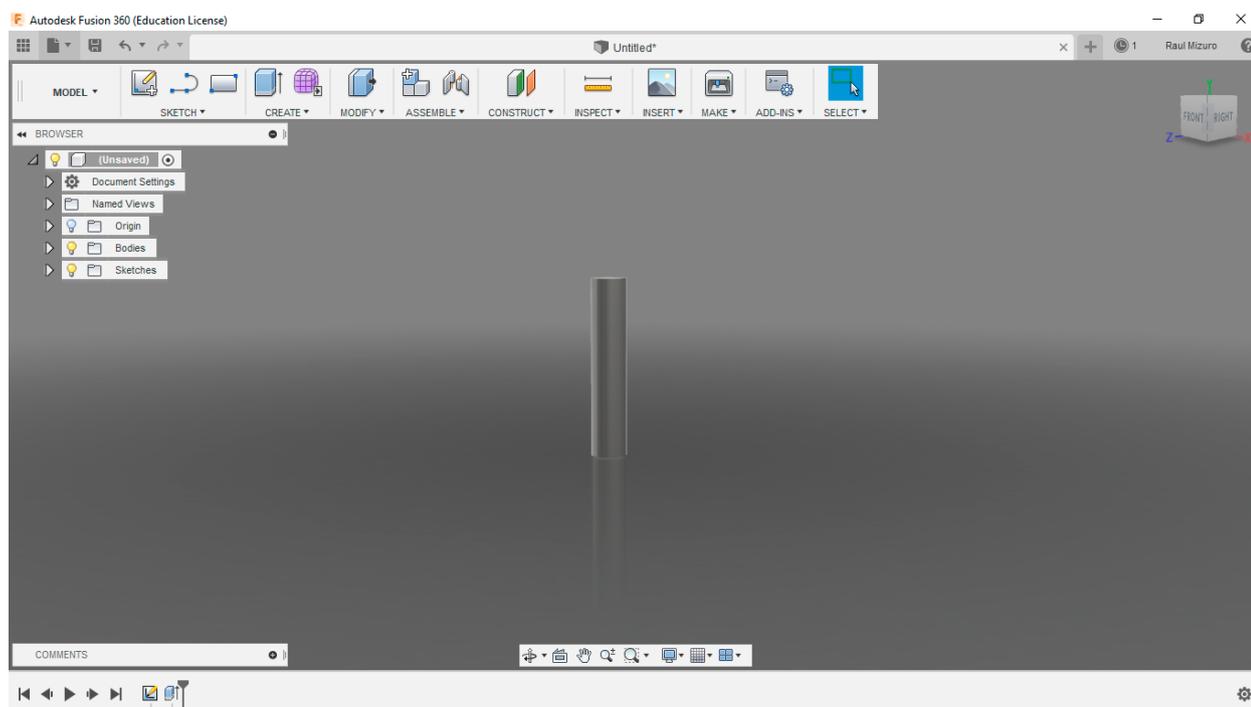
6.1 MODELAGEM DIGITAL

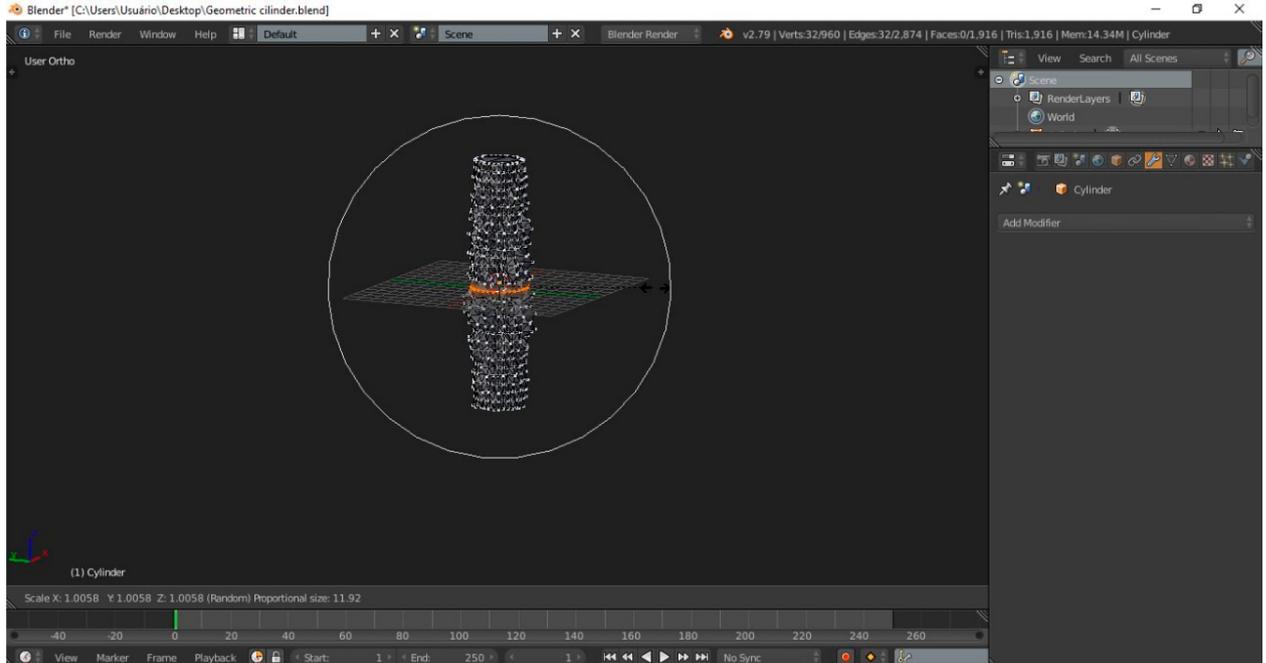
7 Disponível em: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>

Figura 04. Modelo digital de geometria simples desenvolvido no Fusion 360. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

Após a definição dos métodos para a manufatura das peças, iniciou-se a etapa de modelagem digital. A fim de reproduzir o erro de superfície observado em pesquisas anteriores (Figura 02), as formas modeladas seguiram cilíndricas, havendo 50mm de altura e um raio de 10mm.

O primeiro modelo digital foi desenvolvido através do *software* Fusion 360 da Autodesk⁷ com licença estudantil, usando o processo de extrusão de um círculo e exportado em formato STL com alta qualidade. A superfície do cilindro não sofreu alteração, mantendo um aspecto liso.





O segundo modelo digital foi desenvolvido através do *software* Blender⁸ (*open source*), utilizando a mesma ferramenta de extrusão de forma para gerar o cilindro. Contudo, após a formulação da peça, sua superfície foi dividida em 32 faces e alterada de maneira aleatória. Após a modelagem, a peça foi exportada em STL e escalada para atender as medidas de 50mm de altura e 10mm de raio.

Figura 05. Modelo digital da geometria complexa desenvolvido no Blender. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

6.2 IMPRESSÃO 3D

Com os modelos digitais concluídos, ambos os STLs foram enviados para o *software* CAM Ultimaker Cura⁹, também *open source*. De maneira a isolar as variáveis da quantidade de peças e variação de superfície, todos os parâmetros englobados pelo Cura foram iguais para todas as impressões. As configurações gerais de manufatura da peça foram:

8 Disponível em: <https://www.blender.org/>

- Temperaturas: 215° C no bico extrusor, responsável pelo aquecimento do material a ser impresso; 40° C na mesa aquecida, responsável por melhorar a adesão das peças;
- Velocidades: 70mm/s de passo nos eixos X e Y da máquina;
- Suportes: apenas a aplicação de *brim* (suporte lateral, aumentando a superfície de contato da peça na mesa, também ajudando na adesão);
- Preenchimento: 20% de preenchimento interno das peças, seguindo padrão triangular;
- Espessura da camada: 0,2mm de altura da peça;

9 Disponível em: <https://ultimaker.com/en/products/ultimaker-cura-software>

Os arquivos foram convertidos pelo *software* Cura em Código G¹⁰, enviados para a impressora 3D FFF Moustu Builder Mega 2, equipamento cartesiano de eixos X e Y, com mesa aquecida e chassi fechado. O material usado em todas as impressões foi

10 Código G, do inglês G-Code, é a nome dado à linguagem de programação criada a partir da necessidade equipamentos industriais que faziam uso de sistemas Comando Numérico Computadorizado (CNC).

11 <https://www.faac.unesp.br/#!/graduacao/cursos/design/laboratorios-didaticos/ldmp/>

um rolo de filamento Poli Ácido Lático (PLA) branco, disponibilizado pelo Laboratório de Materiais e Protótipos - LDMP¹¹ da UNESP.

A impressão da geometria simples sozinha demorou 44 minutos, além do tempo de preparação de arquivo. No modelo com superfície complexa, o tempo de impressão da peça demorou 45 minutos. Sendo duplo por impressão, no entanto, o tempo do modelo simples chega à 52 minutos, enquanto o da superfície complexa tomou 1 hora e 3 minutos.

Entre as impressões de peças simples e duplas, houve uma diferença de massa indicada por uma balança na escala de decigramas, sendo a média do cilindro simples $2,3 \pm 0,1g$, enquanto a forma complexa $2,7 \pm 0,1g$.

Figura 06. Modelo Builder Mega 2 da empresa Mousta, impressora FFF usada para a pesquisa. Fonte: <https://www.mousta.com.br/wp-content/uploads/2018/10/produto-builder-mega-2-600x600.png> (2019).

A impressão individual do cilindro simples manteve uma superfície lisa em quase toda peça, havendo apenas uma área rugosa na linha de costura do processo. Contudo, a presença de um segundo cilindro por impressão gerou o efeito *stringing* e, devido a inércia do material, gerou uma superfície rugosa na lateral, como é possível ver na figura 07.

A impressão individual da geometria complexa manteve os detalhes e pontas da peça sem deixar as faces rugosas. No entanto, na impressão com duas peças, percebeu-se uma rugosidade nas faces e um arredondamento dos cantos.

6.3 INSPEÇÃO POR DIGITALIZAÇÃO 3D

Figura 07. Corpos de prova impressos. Da esquerda para direita: geometrias complexas duplas; geometria complexa única; cilindro simples único; cilindro simples duplo. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

Concluídas as impressões, apenas foi necessário a remoção do brim com auxílio de um alicate de corte e a aplicação de pó revelador na superfície das peças para possibilitar o processo de digitalização 3D. O modelo do scanner usado foi o ATOS II 2M da empresa GOM GmbH, máquina de digitalização 3D por metrologia óptica, usando a lente de 35mm (resolução nominal de 20 microns), atingindo 2 milhões de pontos em uma área de 50x50mm, disponibilizado pelo Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos - CADEP da UNESP.





Com os modelos digitalizados, utilizou-se o programa *freeware* GOM Inspect¹² para executar os processos de inspeção, de maneira a comparar a precisão da superfície das peças em relação ao modelo gerado pelos Fusion 360 e Blender, gerando um mapa de cores no próprio renderizador em tempo real 3D e um diagrama da variação superficial.

O diagrama de variação superficial em comparação com os modelos originais gerados pelos *softwares* de modelagem digital exige que o operador gere um plano na malha, isolando um eixo de variação. Foram digitalizadas as partes similares em relação aos dois modelos por melhor e pior acabamento superficial através de critério visual e tátil dos operadores.

Figura 08. Modelo GOM ATOS II 2M executando a digitalização das peças impressas. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

¹² Disponível em: <https://www.gom.com/3d-software/gom-inspect.html>

Figura 09. Superfície do cilindro simples impresso individualmente em mapa de cores. As regiões verdes indicam maior fidelidade em relação ao modelo original, enquanto os vermelhos indicam excesso e, os azuis, menos material. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

6.3.1 CORPO DE PROVA - GEOMETRIA SIMPLES

Na primeira inspeção, observou-se que a impressão do cilindro simples individual manteve uma boa precisão em relação ao modelo original. Para avaliar a superfície da peça, duas linhas foram traçadas no desenvolvimento do diagrama: linha de costura do processo (onde deve haver menos material) e na superfície geral da peça.

O diagrama gerado pelo programa identificou, na superfície geral da peça, uma variação de $-0,01$ a $0,07$ mm por picos, sendo 0 a medida original do modelo desenvolvido no computador. Na superfície da costura de peça houve uma variação de $-0,08$ a $0,09$ mm por picos em relação ao modelo original.

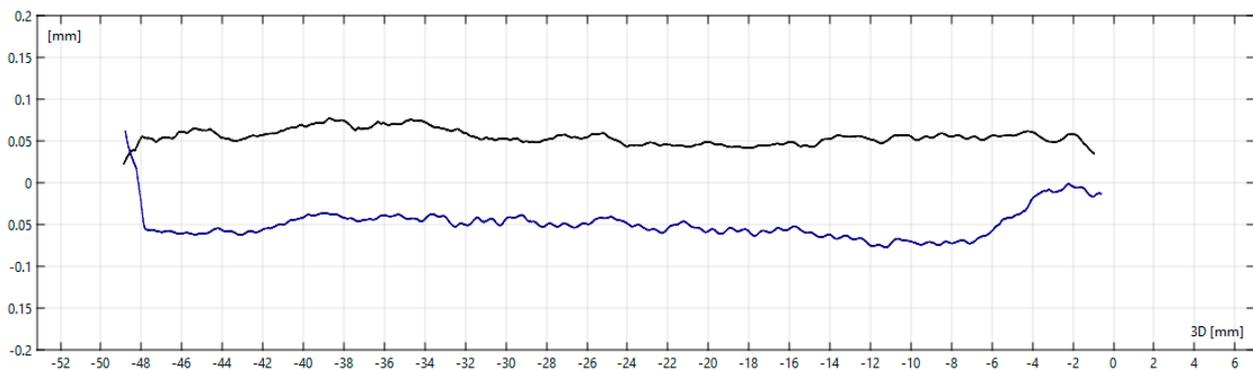
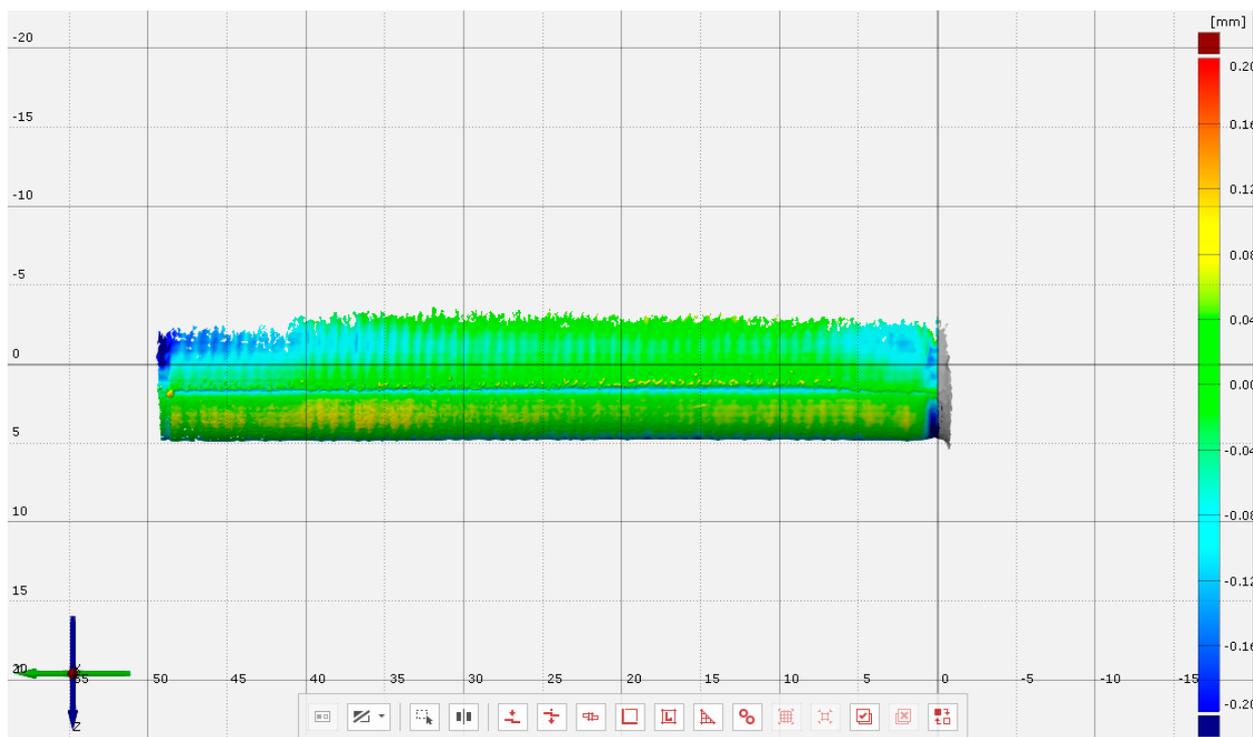
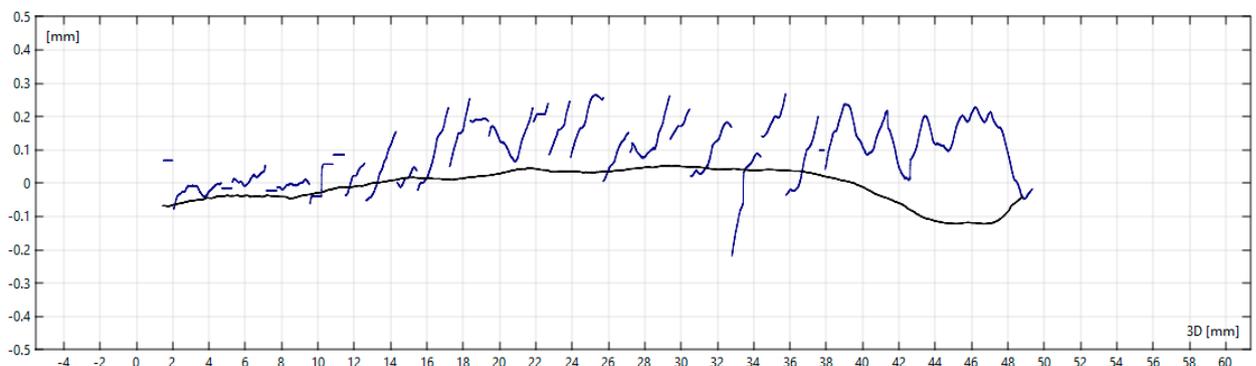
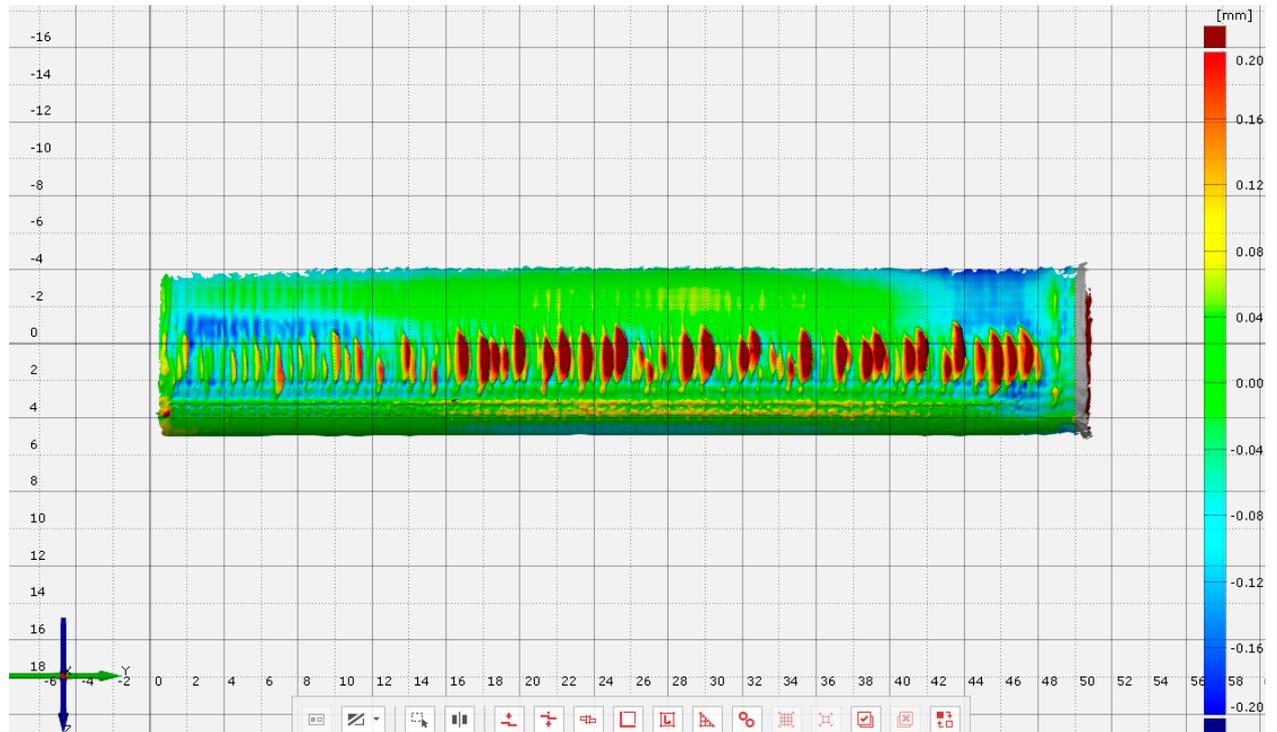


Figura 10. Diagrama de desvio da superfície do cilindro simples impresso individualmente. A linha preta indica a superfície geral da peça, enquanto a azul indica a linha de costura. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

Em comparação, a superfície do cilindro simples impresso em dupla demonstrou maiores variações de medida em relação ao modelo original. O diagrama gerado pelo programa identificou, na superfície geral da peça, uma variação de $-0,13$ a $0,06$ mm por pico. A superfície da peça que sofreu mais variações por conta dos efeitos *stringing* e defeitos gerais do processo demonstrou uma irregularidade maior, chegando de $-0,07$ a $0,3$ mm por pico.

Figura 11. Superfície do cilindro simples impresso em dupla em mapa de cores. As regiões verdes indicam maior fidelidade em relação ao modelo original, enquanto os vermelhos indicam excesso e, os azuis, menos material. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.



6.3.2 CORPO DE PROVA - GEOMETRIA COM SUPERFÍCIE COMPLEXA

Diferente do cilindro simples que tem uma superfície lisa, o próprio modelo original da peça desenvolvida no Blender possui variações geométricas no seu comprimento. Essa característica impossibilita o diagrama para avaliar a rugosidade da peça,

Figura 12. Diagrama de desvio da superfície do cilindro simples impresso em dupla. A linha preta indica a superfície geral da peça, enquanto a azul indica os defeitos gerados pelo movimento irregular do bico extrusor. As linhas que não estão

representadas no gráfico são irregularidades da malha não digitalizadas pelo scanner. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

havendo a necessidade de aplicar outra ferramenta através do gráfico. Traçam-se duas linhas sobrepostas no mesmo plano, sendo uma na peça digitalizada e uma na peça original. Em seguida, gera-se o diagrama das duas linhas, onde é possível ver as divergências entre elas. Além disso, a inspeção de comparação geral ainda é possível. O diagrama gerado pelo programa identificou, na superfície geral da peça, uma variação de $-0,09$ à $0,13$ mm por picos em relação ao original.

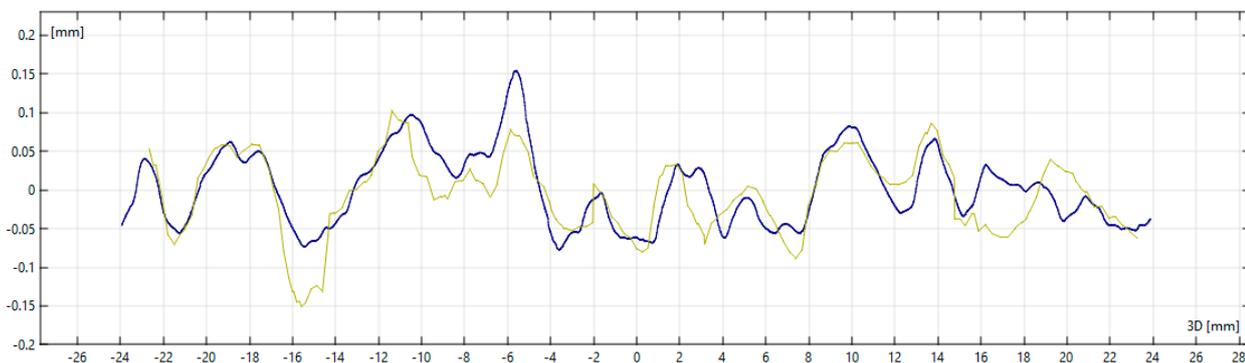
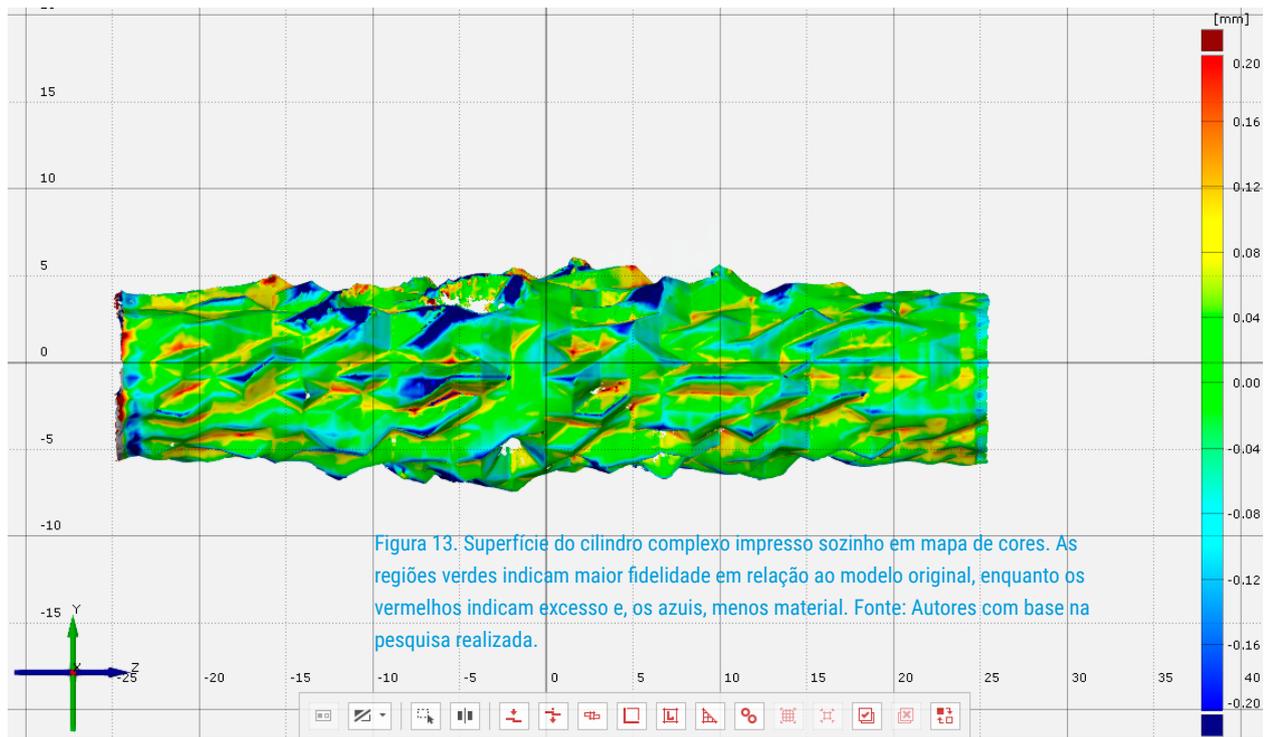
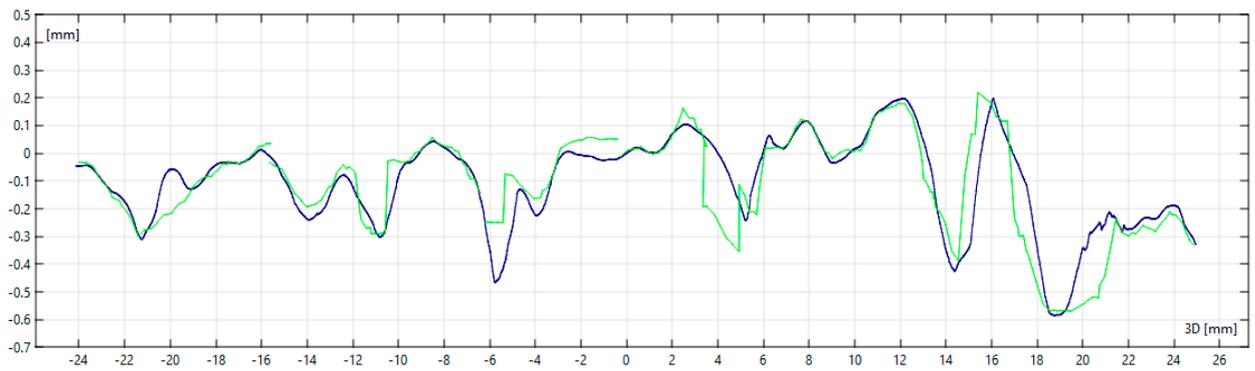
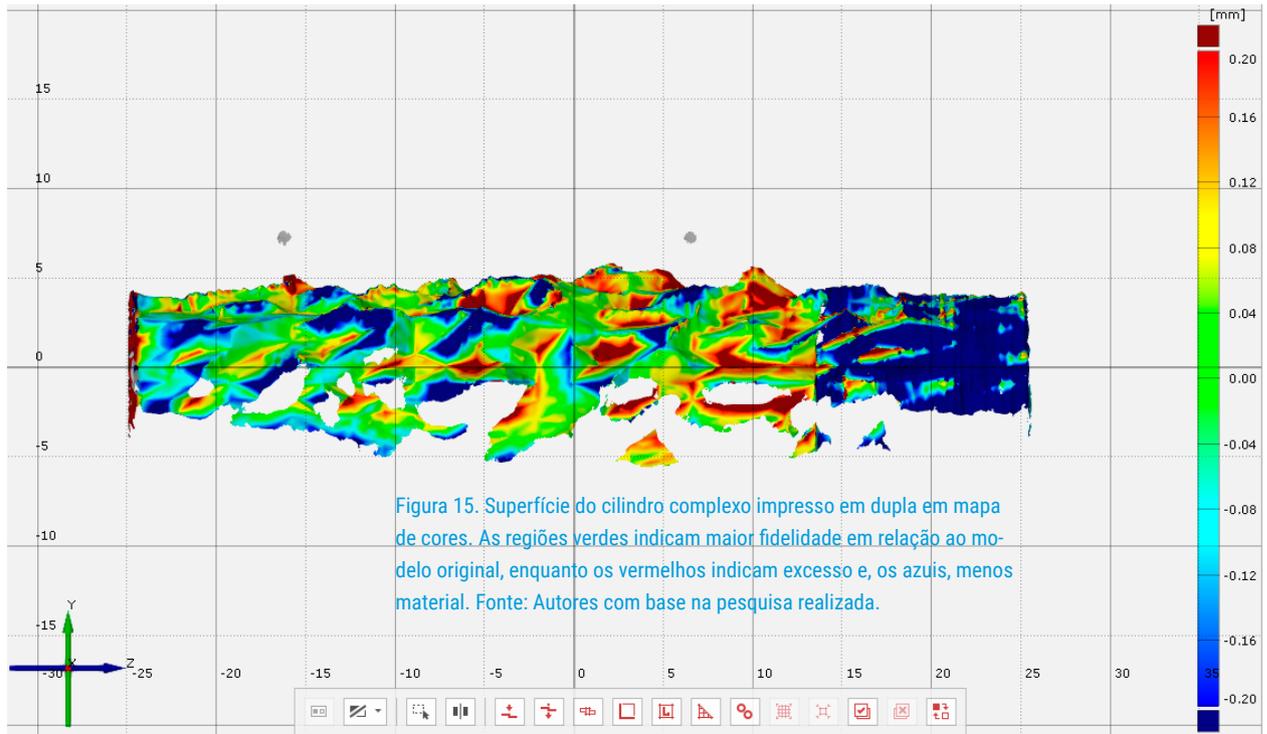


Figura 14. Diagrama de desvio da superfície da geometria complexa impresso sozinho. A linha azul indica a superfície geral da peça digitalizada, enquanto a verde indica a superfície do modelo original. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

6.3.3 MÉDIA E DESVIO PADRÃO

Desvio padrão é uma medida de dispersão estatística que, neste trabalho, representa o quão dispersos da média estão um conjunto de pontos da superfície da peça impressa captados pelo instrumento de medição óptica. De acordo com Altman e Bland (2005), ao calcularmos o desvio padrão (*standard deviation*) de uma amostra, utilizamos essa medida para estimar a variabilidade de uma população da qual a amostra foi retirada. De acordo com os autores, devemos usar o

desvio padrão para dizer o quão amplamente dispersas as medições são. Ainda, alertam que essa medida não deve ser confundida com erro padrão (*standard error*) que, por sua vez, representa a estimativa do quanto a média amostral vai variar do desvio padrão. “Erro padrão é um tipo de desvio padrão” (ALTMAN e BLAND, 2005, p. 903).



Com os dados gerados pelo diagrama, foi possível calcular a média e o desvio padrão de cada uma das digitalizações. Esse procedimento foi executado exportando a tabela de resultados do *software* GOM *Inspect* e calculado no programa Google Planilhas. Os resultados, dispostos na Tabela 3, demonstram que a linha de costura da peça simples única (área da costura - ponto onde o bico extrusor completa a volta do círculo e muda sua altura para prosseguir na próxima camada) possui uma média de material a menos em relação ao modelo original, enquanto as outras regiões excedem. Contudo, o mesmo não ocorre na peça simples dupla, onde existe mais material em ambos os casos. Em relação às peças complexas, percebe-se um excesso de material na peça impressa sozinha, enquanto a dupla possui menos material.

Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

Tabela 3: Média e Desvio padrão (em milímetros) das superfícies das peças impressas e digitalizadas

O que mais demonstrava variação, no entanto, foi o desvio padrão das peças. Percebe-se que a simples única possui um desvio de 0,012 e 0,025 (respectivamente, Base e Pior área), enquanto a manufaturada em conjunto recebe um aumento de 0,051 e 0,117. O mesmo problema ocorre na peça complexa, onde existe um aumento de 0,060 para 0,181 de desvio padrão no caso da manufaturada em conjunto, demonstrando maiores variações de superfície.

| | SIMPLES ÚNICA | | SIMPLES DUPLA | | COMPLEXA ÚNICA | COMPLEXA DUPLA |
|---------------|---------------|-----------|---------------|-----------|----------------|----------------|
| | LINHA BASE | PIOR ÁREA | LINHA BASE | PIOR ÁREA | LINHA ÚNICA | LINHA ÚNICA |
| MÉDIA | 0,055 | -0,051 | 0,011 | 0,088 | 0,011 | -0,061 |
| DESVIO PADRÃO | 0,012 | 0,025 | 0,051 | 0,117 | 0,060 | 0,181 |

Figura 17. Diagrama representativo de média e desvio padrão das peças dos Corpos de Prova - Geometria Simples. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

Apresenta-se, então, que as variações em relação ao modelo original a geometria simples única possui $0,055 \pm 0,012\text{mm}$ e $-0,051 \pm 0,025\text{mm}$ (respectivamente, linha base e pior área), geometria simples dupla possui $0,011 \pm 0,051\text{mm}$ e $0,088 \pm 0,117\text{mm}$ (respectivamente, linha base e pior área), geometria complexa única possui $0,011 \pm 0,060\text{mm}$ e geometria complexa dupla $-0,061 \pm 0,181\text{mm}$. Valores apresentados nas Figuras 17 e 18.

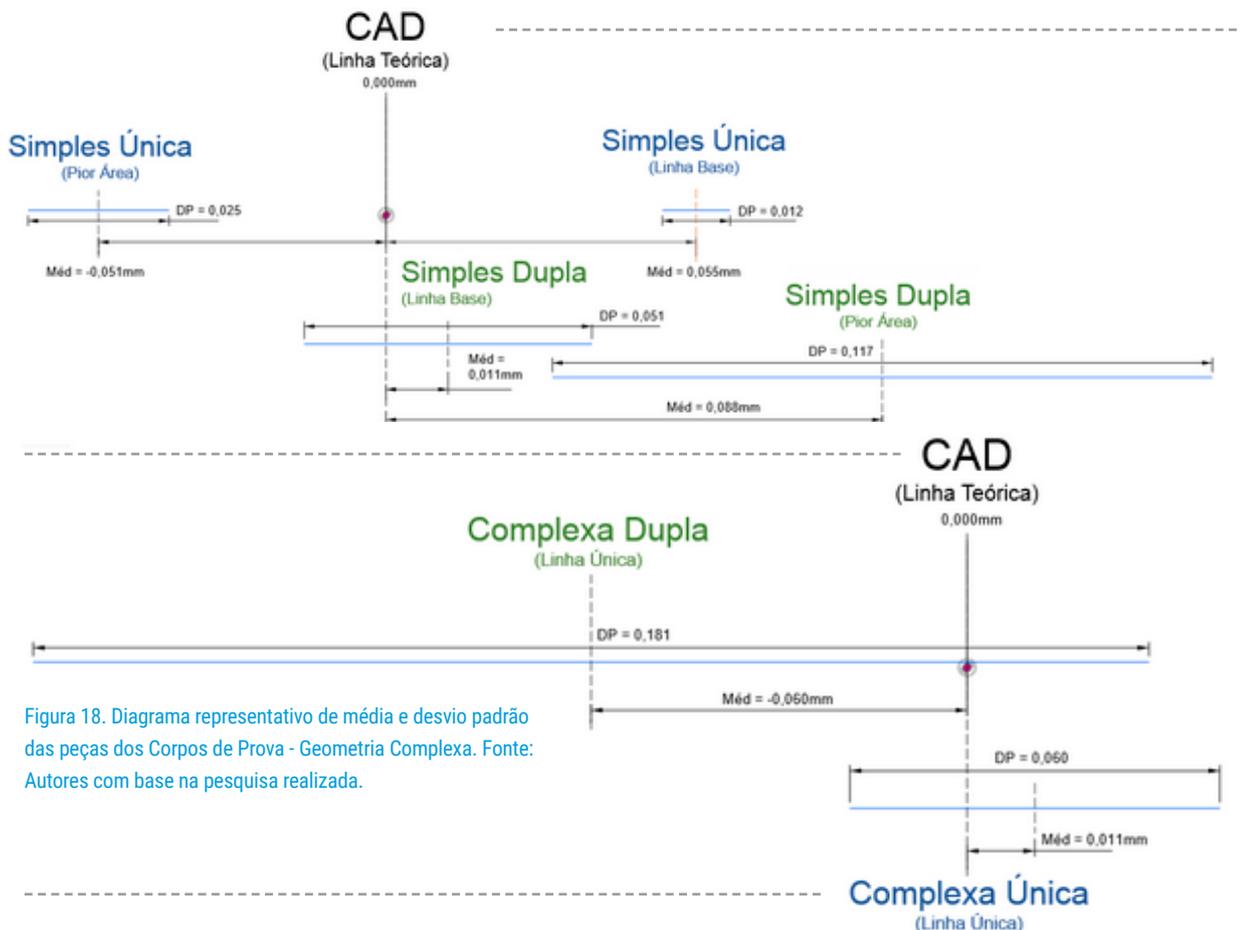


Figura 18. Diagrama representativo de média e desvio padrão das peças dos Corpos de Prova - Geometria Complexa. Fonte: Autores com base na pesquisa realizada.

7. DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados gerados pela digitalização mostram uma perda de qualidade em peças que foram impressas em dupla, independente da geometria. Com os resultados foi possível observar que o cilindro simples impresso sozinho tem um desvio padrão menor do que o feito em conjunto e atinge picos de no máximo 0,07 e -0,01mm contra 0,3 e -0,07mm da peça dupla, porém consumindo 36 minutos à mais para caso o operador deseje fabricar duas peças (no caso, duas vezes o tempo individual de impressão).

Da mesma maneira, a geometria complexa impressa em sozinha tem picos de variação de no máximo 0,13 e -0,09 mm contra -0,48 a 0,22mm da manufaturada em dupla, porém consumindo 27 minutos à mais para caso o operador deseje fabricar duas peças. O desvio padrão também é maior no caso da dupla.

Essas variações podem ser resolvidas através de etapas de acabamento superficial, como lixamento ou aplicação de massa para cobrir imperfeições. Entretanto, isso pode representar incutir irregularidades decorrentes do processo manual, além de demandar certa experiência em acabamentos por parte do operador. Ademais, o que pode ser observado é o fator de percepção visual das peças impressas, onde a geometria complexa dupla consegue disfarçar os erros superficiais em comparação ao cilindro simples que, por sua vez, deixa os defeitos mais visíveis. Esse fator pode não ser um problema para o desenvolvimento de peças que não exigem precisão superficial, mas pode acarretar em erros para outras aplicações como escoamento de fluidos e encaixes com ajuste fino, sendo algo que o projetista deve considerar no desenvolvimento.

Uma alternativa para mitigar a variação de superfície seria compensar essa variação de processo ainda em fase de projeto, ou seja, a partir de dados encontrados em experimentos para compensar numericamente as dimensões no CAD. Ressalta-se que essa pesquisa não pretendeu ser estatisticamente representativa. Portanto, para que o projetista determine esse valor de compensação seria adequado realizar experimentos estatisticamente robustos e enfocando em variáveis como modelos de impressoras 3D, material dos filamentos, parâmetros de impressão, entre outros.

É possível considerar também, conforme explorado na pesquisa, que a análise tridimensional por meio do Scanner 3D possibilitou avaliar a superfície das amostras de maneira quantitativa, permitindo a exploração da área de tecnologias prototipagem rápida com um enfoque acurado e objetivo. As verificações visuais e táteis, não abordadas na presente pesquisa, são válidas e também importantes para verificação de qualidade de peças impressas tridimensionalmente, entretanto carecem de objetividade e podem, juntamente com as análises quantitativas compor uma avaliação mais completa dos processos de impressão 3D.

Percebe-se, por fim, que a partir das descobertas geradas pela pesquisa existem possibilidades de futuras pesquisas ao testar outras geometrias, variações de parâmetros da impressão 3D e realizar mais correlações entre verificações visuais e manuais em conjunto com dados mensuráveis pelos sistemas ópticos de medição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil) pelo apoio financeiro da pesquisa (respectivamente, processos n.º 2018/01213-1 e 88887.319160/2019-00).

REFERÊNCIAS

3DLAB. **20 Principais erros de impressão e como resolvê-los.** Disponível em: <https://3dlab.com.br/20-principais-erros-de-impressao/>. Acesso em: 24 maio 2019.

ALVARADO, R. G.; BRUSCATO U. M.; **Evaluación de Experiencias de Fabricación Digital en la Enseñanza de Arquitectura.** In: International Conference ICBL, 3, 2009, Florianópolis. Anais... Florianópolis: UFSC, 2009.

ALTMAN, D. G.; BLAND, J. M. **Standard deviations and standard errors.** BMJ, 331(7521), 903. 2005.

BARROS, A.M.; **Fabricação Digital:** sistematização metodológica para o desenvolvimento de artefatos com ênfase em sustentabilidade ambiental. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2011.

CADEP. **Centro Avançado de Desenvolvimento de Produtos.** São Paulo, mai. [2013?a]. Disponível em: <http://www.cadepunesp.com.br/>. Acesso em: 24 maio 2019.

CADEP. **Sistema ótico de digitalização 3D móvel GOM Atos | 2M.** São Paulo, mai. [2013?b]. Disponível em: <http://www.cadepunesp.com.br/p/3datos.html>. Acesso em: 24 maio 2019.

CALEGARI, Eliana Paula *et al.* 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. Disponível em: <http://www.revistas.udesc.br/index.php/dapesquisa/article/view/7994>. Acesso em: 25 mai. 2019.

EYCHENNE, F.; NEVES, H. **Fab Lab: A Vanguarda da Nova Revolução Industrial.** São Paulo: Fab Lab Brasil, 2013.

SILVA, F. P.; DUARTE, L. C.; ROLDO, L.; KINDLEIN, W. Jr. **A Digitalização Tridimensional Móvel e sua aplicação no Design de Produto.** Revista Design & Tecnologia, p. 60-65, 2010.

GERSHENFELD, N. **How to Make Almost Anything:** The Digital Fabrication Revolution. Foreign Affairs, Tampa, nov.-dez. 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

JURISATO, A.S. et al. **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, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica.** 8. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

MOTA, Catarina.; **The Rise of Personal Fabrication**. In: Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition, 2011, Lisboa. Anais... Lisboa, 2011, p. 279-288. <http://doi.acm.org/10.1145/2069618.2069665>. Acesso em 24 maio 2017.

PEREIRA, D.D.; **O uso da modelagem aplicada à ergonomia no desenvolvimento de produtos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Campus Bauru), Bauru, 2015.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico [recurso eletrônico]: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

SEELY, Jennifer C.K.; **Digital Fabrication in the Architectural Design process**. Dissertação (Mestrado) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2004.

SILVA, Fábio Pinto da. **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, 2006.

SILVA, Letícia Alcará da; RODRIGUES, Osmar Vicente. A digitalização óptica tridimensional no desenvolvimento de próteses. *In: Anais do Salão de Iniciação Científica do Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento, 2014, Porto Alegre: UniRitter, 2014*. Disponível em: http://www.ufrgs.br/ped2014/trabalhos/trabalhos/1005_arq2.pdf. Acesso em: 24 mai 2019.

UNESP, 2013, p. 09694. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/147001>. Acesso em: 24 maio 2019.

VOLPATO, Neri. **Manufatura Aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

