

# APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE PREENCHIMENTO INTELIGENTE NA MANUFATURA ADITIVA POR FFF DE CORPOS DE PROVA COM VALIDAÇÃO ESTRUTURAL ATRAVÉS DE ENSAIOS MECÂNICOS E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS

Gabriel Masile Honda <sup>1</sup>; Marcelo Otávio dos Santos <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

**Resumo.** *Com o advento das tecnologias de manufatura aditiva, as grandes empresas têm se aprofundado em estudos para saber como adaptar seus processos ao uso desta tecnologia que chegou para modificar a maneira como se fabricam os produtos. O objetivo desse projeto será desenvolver e aplicar uma metodologia de otimização estrutural durante o preenchimento de peças no processo de manufatura aditiva por FFF (Fused Filament Fabrication), denominada Preenchimento Inteligente. Busca-se, portanto, otimizar a resistência de corpos de prova de acordo com as solicitações mecânicas apenas mudando a estrutura do preenchimento interno. Foi escolhido uma geometria e material para análise computacional no software de CAE chamado MSC Digimat RP, específico para manufatura aditiva, onde será levado em consideração o comportamento das tensões atuantes, deflexões máximas, fusão entre camadas e preenchimento interno envolvidos no processo. A partir dos resultados computacionais, as mesmas peças serão impressas com o preenchimento inteligente e com preenchimento convencional, e desta maneira serão comparadas através de ensaios mecânicos para cada corpo de prova. Dessa maneira, busca-se comprovar a eficiência do método de preenchimento inteligente, permitindo uma melhora na resistência mecânica da peça, reduzindo a massa e mantendo a estrutura externa inalterada.*

## Introdução

A quarta revolução industrial, também chamada de Indústria 4.0, é o movimento que une os conceitos de produção em larga escala com a tecnologia de automação inteligente. Nele, a tecnologia de manufatura aditiva *MA* (*Additive Manufacturing - AM*) desempenha um papel importante na competitividade econômica.

O advento da manufatura aditiva na sociedade moderna tem sido um tema de discussão cada vez mais recorrente, enquanto o uso desse método de manufatura tem sido um poderoso aliado aos métodos tradicionais de produção industrial, essa tecnologia também está sendo implementada para usos domésticos em uma proporção na qual leva-se a crer que terá um potencial para ser altamente disruptiva para o modelo de negócio atual (RAYNA; STRIUKOVA, 2015).

De acordo com Dilberoglu *et al.* (2017), a manufatura aditiva pode tornar-se uma tecnologia chave para a fabricação de produtos customizados por conta da sua habilidade em criar objetos sofisticados com atributos avançados (novos materiais e geometrias). Em virtude do crescimento da qualidade dos seus produtos, a *MA* está atualmente sendo utilizada em diversas indústrias, tais como: a aeroespacial, biomédica e manufatura. Sendo uma tecnologia em desenvolvimento para criar objetos complexos, com maior precisão, mais resistentes, menor peso, menor custo e com maior velocidade de produção, é certo de que ela oferecerá uma maneira de substituir as técnicas convencionais de manufatura em um futuro muito próximo.

A tecnologia de *MA* ou impressão *3D* é verdadeiramente inovadora, abre novas oportunidades e fornece esperança para várias possibilidades às empresas que buscam aprimorar a eficiência de fabricação. Termoplásticos convencionais, cerâmicas, materiais à base de grafeno e metais são os materiais os quais podem ser impressos pela tecnologia de impressão

3D. A tecnologia de impressão 3D tem o potencial de revolucionar indústrias e remodelar a linha de produção (Shahrubudin et al 2019).

Os diversos tipos de manufatura aditiva são capazes de atender as variadas exigências de flexibilidade da manufatura avançada, com alto grau de personalização e solicitações estruturais (PORTO, 2016). Para o aprimoramento do comportamento mecânico dos produtos, a otimização estrutural objetiva a melhora do comportamento mecânico com base em modificações na estrutura do componente (BENDSOE; SIGMUND, 2003).

Os materiais disponíveis para a MA, apesar do avanço recente, ainda são escassos se comparados à quantidade de opções de matérias-primas disponíveis nos processos convencionais. Além disso, os dados técnicos do material ficam limitados aos que são disponibilizados pelos fabricantes, sendo necessário recorrer a contatos diretos com os mesmos ou a testes mecânicos seguindo normas de ensaios de materiais poliméricos (BUENO, 2012). Segundo Zhai, Lados e Lagoy (2014), a evolução da manufatura aditiva é a otimização de processos e materiais, desenvolvendo metodologias de produção de matéria prima e produto, a fim de aprimorar as propriedades mecânicas das matérias primas, assim como o comportamento mecânico dos produtos.

Enquanto a MA era no início, devido ao custo, utilizada principalmente pelas grandes corporações, a diminuição progressiva do preço levou a uma adoção mais ampla. Hoje em dia, grande parte das impressoras 3D na faixa de U\$1,000 à U\$4,000 são destinadas a pequenas e médias empresas e empresários que utilizam prototipagem rápida. A qualidade da prototipagem também melhorou e, hoje em dia, as impressoras de gama superior, que custam a partir de U\$200 mil, são capazes de construir protótipos multi-material totalmente funcionais de uma só vez. (RAYNA; STRIUKOVA, 2015).

O desenvolvimento de técnicas de otimização estrutural, como a otimização topológica e a crescente utilização de *softwares* comerciais têm permitido também grandes avanços em manufatura aditiva. A otimização topológica é um campo de pesquisa da engenharia que tem o objetivo de projetar a topologia ótima de estruturas segundo determinado conjunto de critérios de projeto, podendo ser a procura do menor peso da estrutura, ou a restrição a um dado valor limite de tensão, deslocamento ou de frequência natural do componente (ALMEIDA; SIMONETTI; NEVES, 2014).

Neste contexto, observa-se que geometrias complexas podem ser facilmente criadas pelo preenchimento inteligente de material apenas onde é mais necessário mecanicamente. Os modelos digitais não são apenas de forma livre, mas também podem ser compartilhados pelo mundo todo, o que torna possível a produção local instantânea em uma escala global. Além disso, a tecnologia MA não requer moldes, acessórios, ou ferramentas, o que efetivamente reduz o longo período de desenvolvimento de um produto causado pelo lento processo de fabricação e design dos moldes e/ou das ferramentas.

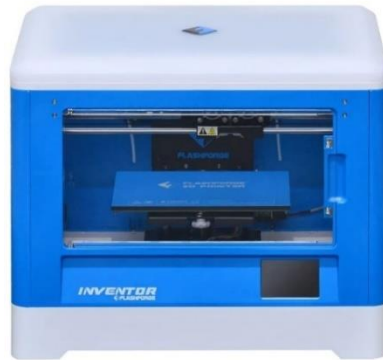
O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e aplicação de um método de aprimoramento do comportamento mecânico de componentes impressos por tecnologia FFF (Fabricação com Filamento Fundido), através da otimização estrutural do seu preenchimento interno, buscando melhorar a resistência mecânica do componente otimizado em relação ao impresso de maneira convencional mantendo ou até mesmo diminuindo a sua massa. Espera-se um confronto dos resultados experimentais e simulados das peças otimizadas e não otimizadas.

## **Materiais e Métodos**

A otimização por preenchimento inteligente consiste na redistribuição do material em um domínio pré-definido pela topologia otimizada da estrutura buscando maximizar as propriedades mecânicas finais da peça em função das solicitações de trabalho. O procedimento para atingir a geometria desejada requer uma série de etapas intermediárias que utilizam um conjunto de *softwares* de manufatura aditiva e otimização topológica. As impressões das peças

e corpos de prova foram feitas com o auxílio da impressora 3D *Inventor*, da *Flashforge*, e filamentos de *PLA*, fornecidos pela *3DProcer* (Figura 1).

Figura 1 - Impressora *Inventor* da *Flashforge*



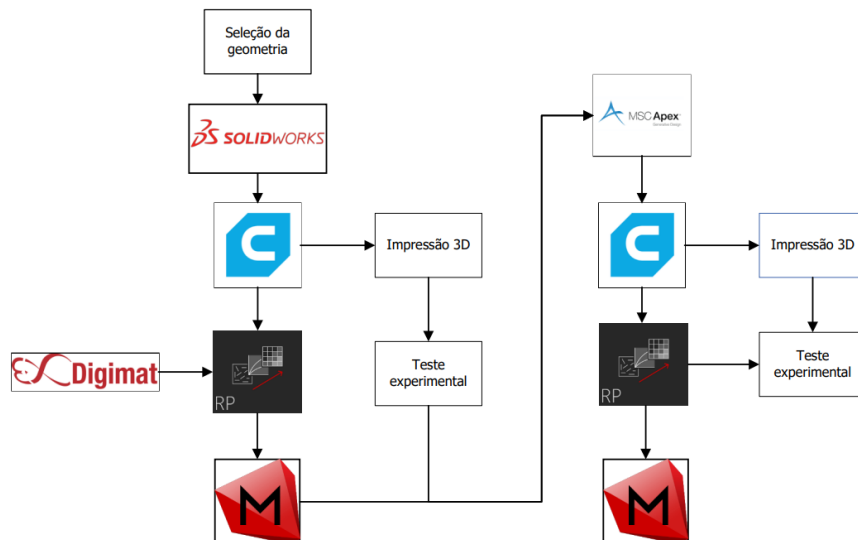
Fonte: Site do fabricante *Flashforge*

Para conseguir atingir os resultados esperados ao final do trabalho, é necessário definir uma série de etapas, mostradas a seguir:

- Definição dos materiais adequados para análise do comportamento mecânico em peça polimérica impressa em 3D;
- Levantamento das propriedades dos materiais selecionados através de ensaios mecânicos conforme normas indicadas na revisão de literatura;
- Definição das geometrias dos componentes estruturais que serão analisados em flexão pura;
- Realização da otimização topológica do componente, por meio de *software*, para mobilizar o preenchimento de forma inteligente, de maneira a garantir a melhora do comportamento mecânico, mantendo ou diminuindo a sua massa;
- Realização de nova simulação estrutural dos componentes, nas condições convencional e otimizado, para verificação dos comportamentos mecânicos;
- Realização de testes experimentais a fim de validar os resultados obtidos por simulação;
- Elaboração de comparativo dos testes confrontando os resultados obtidos em peças impressas pelos métodos convencionais com o método otimizado.

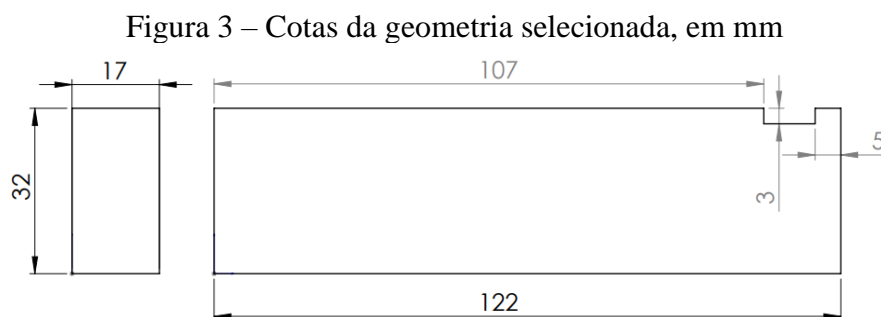
Um fluxograma de todo o processo também é exibido na Figura 2 a seguir:

Figura 2 – Fluxograma do processo de simulação e experimentação



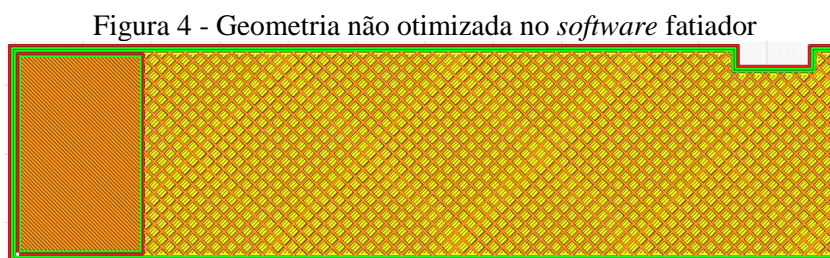
Fonte: próprio autor

A geometria foi selecionada para análise de flexão pura onde o objetivo é coletar os valores do deslocamento vertical (flecha) e tensão superficial externa, com o auxílio de relógio comparador e *strain gauges*. Nesse tipo de análise, a peça é fixada em uma de suas extremidades e na outra é aplicada uma carga vertical para baixo. A geometria e suas dimensões podem ser vistas na Figura 3.



Fonte: próprio autor

Em seguida, após definida a geometria e modelada no *software SolidWorks*, o arquivo é exportado em formato “.*STL*” e inserida no *software* fatiador *Cura3D* com a intenção de prepará-lo para a impressão e para a simulação no *software Digimat RP*. A estratégia adotada foi de definir um preenchimento de 50% da peça, que representa o percentual da região em que terá material impresso, e criar uma casca para efeito estético, bem como facilitar a aplicação da carga. A geometria com esses parâmetros pode ser vista na Figura 4, retirada do próprio *Cura3D*.

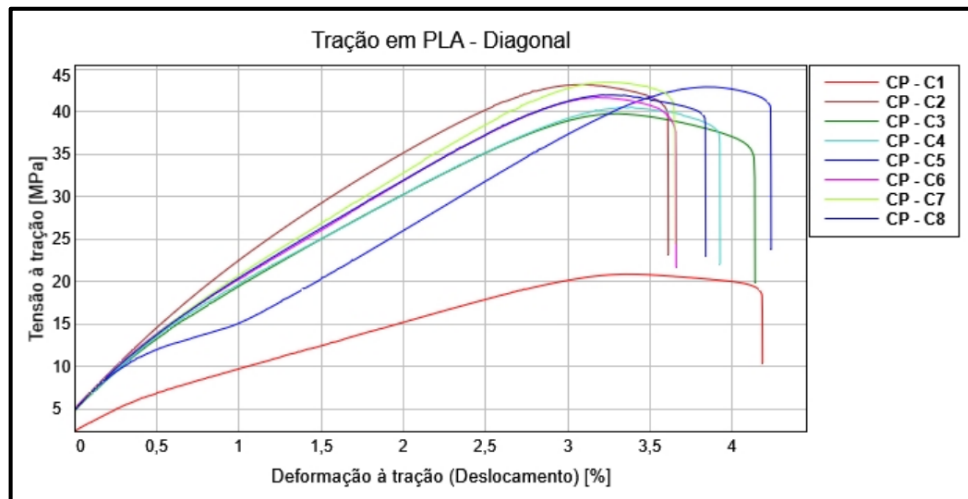


Fonte: próprio autor

Ao final deste procedimento, espera-se gerar um arquivo de extensão *.GCODE* que nada mais é que um conjunto de coordenadas que a extrusora da impressora deve percorrer no momento da impressão.

Em contato com o fornecedor dos filamentos, obteve-se o *datasheet* do material utilizado na impressão com todas as suas propriedades mecânicas determinadas. Para o trabalho, decidiu-se realizar testes de tração em laboratório para validar os resultados e as propriedades do filamento PLA utilizado. Foram impressos no total, oito corpos de prova obedecendo as normas adequadas para testes em polímeros determinadas pela *American Society for Testing and Materials (ASTM)* sob a norma *D638-98*. Os testes realizados forneceram as curvas ilustradas na Figura 5 e suas massas e volumes também foram coletados para determinar a densidade do material.

Figura 5 - Curva de tração dos corpos de prova



Fonte: próprio autor

A partir dos resultados apresentados, nota-se um desvio de propriedades nos corpos de provas C1 e C5 que, portanto, foram descartados. As propriedades obtidas do teste dos corpos de prova e do datasheet fornecido são exibidas abaixo:

- Módulo de Young:  $E_{cp} = 1900 \text{ MPa}$
- Densidade do PLA:  $\rho_{cp} = 1,19 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
  
- Módulo de Young:  $E_{ds} = 3600 \text{ MPa}$
- Densidade do PLA:  $\rho_{ds} = 1,24 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

### Simulação

Prosseguindo para as etapas de simulação, o primeiro *software* a ser utilizado é o módulo *RP* (“*Reinforced Plastics*”) do *software Digimat*. Nele, são requisitados quatro tipos de arquivo para a análise: o primeiro arquivo é o modelo estrutural que depende da geometria, dos esforços e dos apoios da peça selecionada; o segundo contém justamente as propriedades do material – nesse arquivo são utilizados tanto as propriedades obtidas pelos corpos de prova, quanto as obtidas via *datasheet* do fabricante do filamento; por fim, os dois últimos arquivos importados são a geometria maciça da peça no formato “.*STL*”, obtida no *software SolidWorks*, e o *.GCODE* obtido no *software* fatiador *Cura3D*. Com todos esses arquivos, o *software* realiza um mapeamento na geometria maciça a partir do *.GCODE*, gerando um modelo estrutural mapeado e concentrando material apenas onde for determinado.

A simulação realizada pelo *Digimat*, de fato, consiste na aplicação de uma carga com incrementos de 50 N até atingir um total de 250 N. Com o auxílio do *software MSC Marc*, para cada um desses incrementos, são obtidos valores de tensão e deformação da estrutura, bem como os valores da flecha. Esses resultados são comparados ao final com a geometria otimizada e experimentos.

O próximo passo, após as simulações, são os experimentos. A peça impressa é fixada na garra, mostrada na Figura 6, e a carga é aplicada na extremidade oposta. São utilizados *strain gauges* na parte superior da peça para medir a deformação e um relógio comparador para medir a flecha.

Figura 6 - Aparato e configuração experimental



Fonte: próprio autor

A partir dos resultados coletados no *software MSC Marc* e experimentos, são selecionadas duas cargas para a geração da peça otimizada por intermédio do *software Apex GD* (“*Generative Design*”). Diferentemente dos demais *softwares* de otimização topológica que utilizam como critério a rigidez do material, o *Apex GD* realiza as simulações utilizando o critério de máxima resistência do material. Após selecionar as cargas e os apoios no *software*, o algoritmo utiliza preenchimento inteligente e concentra a massa somente nas regiões necessárias, buscando maximizar as propriedades mecânicas da peça.

Novamente, é realizada a impressão das geometrias, agora otimizadas, repetindo todo o procedimento de simulação e experimento realizado para a peça não otimizada.

### Resultados e discussão

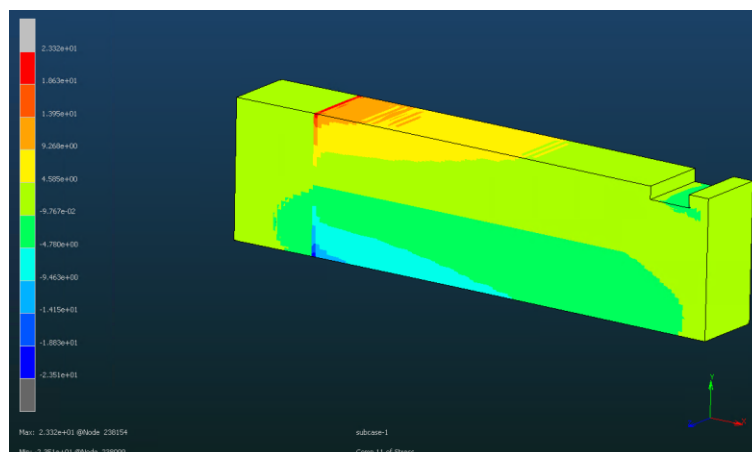
Com a força sendo aplicada em intervalos de 50 N, são coletados os valores de tensão e flecha de cada uma das geometrias até atingir um total de 250 N. A flecha é medida com um relógio comparador posicionado à 34 mm da extremidade livre da peça, enquanto os *strain gauges* são posicionados à 43 mm da extremidade engastada da peça, onde ocorrem as maiores tensões superficiais, como pode ser visto na Figura 7. Essas regiões de maiores tensões superficiais foram previstas pelo *software MSC Marc*, conforme destacado em vermelho e laranja na Figura 8. As impressões das peças não otimizadas tiveram duração média de 6 horas e 15 minutos, possuindo uma massa aproximada de 57 gramas.

Figura 7 – Posicionamento dos *strain gauges* nas peças



Fonte: próprio autor

Figura 8 – Distribuição das tensões superficiais da geometria não otimizada



Fonte: próprio autor

Os primeiros resultados são referentes à geometria não otimizada com 50% de preenchimento. Abaixo encontram-se as tabelas com os resultados comparativos das tensões e flechas entre a simulação e o experimento, para as propriedades do *datasheet* (DS) e dos corpos de prova (CP).

Tabela 1 - Comparação das tensões ( $\sigma$ ) da geometria não otimizada

| Carga<br>[N] | $\sigma_{simulação}$ (DS)<br>[MPa] | $\sigma_{experimental}$ (DS)<br>[MPa] | $\sigma_{simulação}$ (CP)<br>[MPa] | $\sigma_{experimental}$ (CP)<br>[MPa] |
|--------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 50           | 2,070                              | 3,240                                 | 2,073                              | 1,710                                 |
| 100          | 4,139                              | 6,480                                 | 4,143                              | 3,420                                 |
| 150          | 6,210                              | 9,288                                 | 6,217                              | 4,902                                 |
| 200          | 8,282                              | 13,392                                | 8,294                              | 7,068                                 |
| 250          | 10,356                             | 16,258                                | 10,373                             | 8,580                                 |

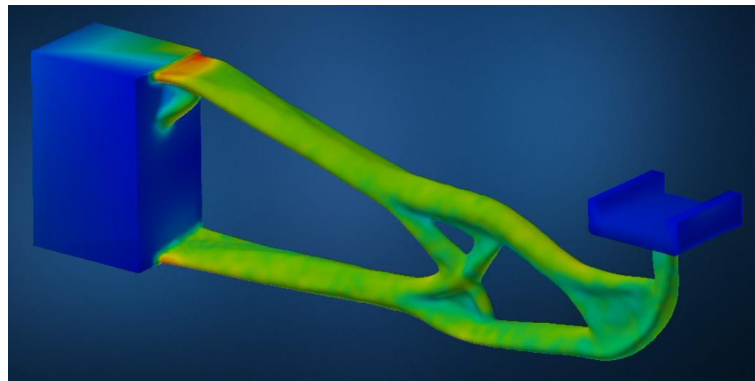
Tabela 2 - Comparação das flechas ( $y$ ) da geometria não otimizada

| Carga<br>[N] | $y_{simulação}$ (DS)<br>[mm] | $y_{simulação}$ (CP)<br>[mm] | $y_{experimental}$<br>[mm] |
|--------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 50           | 0,100                        | 0,190                        | 0,20                       |
| 100          | 0,200                        | 0,380                        | 0,34                       |
| 150          | 0,301                        | 0,570                        | 0,51                       |
| 200          | 0,401                        | 0,760                        | 0,78                       |
| 250          | 0,501                        | 0,950                        | 1,02                       |

Em uma primeira análise, observa-se que os valores de flechas obtidos experimentalmente aproximam-se mais dos resultados da simulação com as propriedades dos corpos de prova. O erro percentual para a carga de 200 N onde se obtiveram as flechas  $y_{exp} = 0,78 \text{ mm}$  e  $y_{sim} = 0,76 \text{ mm}$ , por exemplo, foi de apenas 2,7%. Além disso, as tensões obtidas através de simulação e experimentos também estão mais próximas para as propriedades extraídas dos corpos de prova, algo que não se repete para as tensões com as propriedades retiradas do *datasheet*. Como os resultados para as cargas de 200 e 250 N foram os mais satisfatórios, essas duas cargas foram selecionadas para a análise de otimização topológica

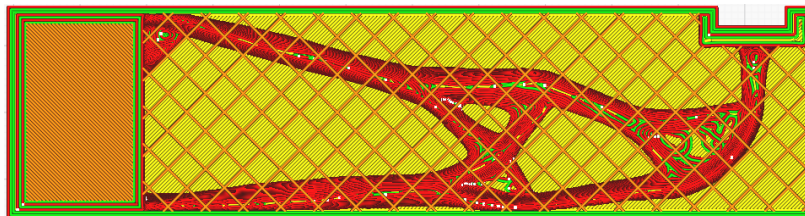
realizada pelo *Apex GD*. As geometrias otimizadas para as duas cargas podem ser vistas nas figuras 9, 10 e 11 a seguir:

Figura 9 – Geometria otimizada para a carga de 200 N



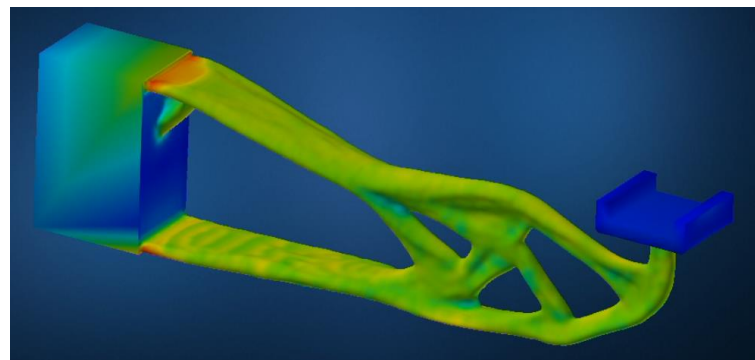
Fonte: próprio autor

Figura 10 – Geometria otimizada para a carga de 200 N no *software* fatiador



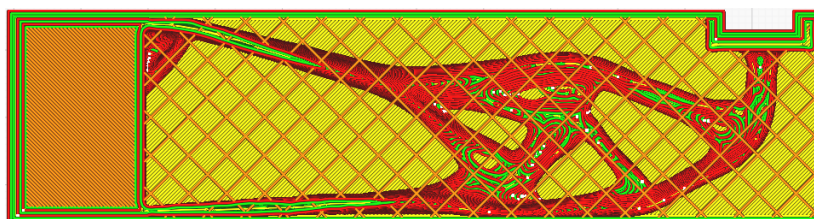
Fonte: próprio autor

Figura 11 – Geometria otimizada para a carga de 250 N



Fonte: próprio autor

Figura 12 – Geometria otimizada para a carga de 200 N no *software* fatiador



Fonte: próprio autor

O resultado da impressão da peça otimizada para a carga de 200 N pode ser visto na Figura 13. Utilizou-se um preenchimento externo de 20% e um interno de 50%. A duração da



impressão para as duas peças otimizadas teve seu tempo reduzido para 5 horas e 47 minutos, em média, com uma massa de, aproximadamente, 42 gramas.

Figura 13 – Peça otimizada para 200 N impressa em PLA



Fonte: próprio autor

As duas geometrias são postas para análise experimental e simulação, e seus resultados das tensões e flechas são comparados nas tabelas 3 e 4 a seguir.

Tabela 3 - Comparação das tensões ( $\sigma$ ) das geometrias otimizadas

| Carga<br>[N] | $\sigma_{simulação}$ (DS)<br>[MPa] | $\sigma_{experimental}$ (DS)<br>[MPa] | $\sigma_{simulação}$ (CP)<br>[MPa] | $\sigma_{experimental}$ (CP)<br>[MPa] |
|--------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 200          | 11,085                             | 14,717                                | 11,112                             | 7,767                                 |
| 250          | 13,227                             | 16,470                                | 13,263                             | 8,692                                 |

Tabela 4 - Comparação das flechas ( $y$ ) das geometrias otimizadas

| Carga<br>[N] | $y_{simulação}$ (DS)<br>[mm] | $y_{simulação}$ (CP)<br>[mm] | $y_{experimental}$<br>[mm] |
|--------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| 200          | 0,510                        | 0,967                        | 0,90                       |
| 250          | 0,595                        | 1,126                        | 1,05                       |

De forma similar ao que foi visto para a peça não otimizada, as flechas obtidas experimentalmente mostraram-se muito próximas das flechas obtidas via simulação utilizando as propriedades dos corpos de prova. O mesmo não pode ser afirmado para as tensões obtidas para os dois cenários analisados, no entanto, ao comparar os valores experimentais das tensões das geometrias otimizadas com a geometria não otimizada, nota-se uma aproximação dos resultados muito satisfatória. Para a carga de 200 N as tensões obtidas para a geometria não otimizada e para a geometria otimizada foram, respectivamente, 7,068 MPa e 7,767 MPa. Para a carga de 250 N as tensões foram de 8,580 MPa e 8,692 MPa. Isso comprova a eficiência do critério de otimização pela máxima resistência mecânica utilizado nas simulações. Seguindo essa mesma linha de raciocínio, observa-se que os valores de flecha entre a peça não otimizada e as otimizadas não se manteve, o que é totalmente esperado já que não foi utilizado o critério de rigidez nas simulações.

Vale mencionar que como os resultados apresentam ordens de grandeza muito reduzida, qualquer diferença entre os valores pode ser justificada por alguns detalhes no momento da experimentação, como a posição em que foram posicionados os *strain gauges* e o relógio comparador. Qualquer pequeno desvio nessas posições causa um impacto relevante nos resultados obtidos podendo afetar as conclusões do trabalho.

## Conclusões

A partir dos resultados obtidos, percebe-se que a utilização do critério de máxima resistência mecânica utilizado no software de otimização topológica mostrou-se coerente, uma vez que as tensões obtidas entre os dois tipos de geometria mantiveram-se muito próximas. No

entanto, não foi possível assegurar os mesmos valores para as flechas da geometria otimizada e não otimizada. Ao retirar massa da peça, seu momento de inércia decaiu, resultando em um maior deslocamento vertical, fato este também previsto nas simulações.

Verificou-se, também, o quão importante é a realização dos testes de corpos de prova para a obtenção das propriedades do material, assim como o confronto com as propriedades retiradas do *datasheet* do filamento fornecido pela fabricante *3DProcer*. Os resultados experimentais aproximaram-se mais dos resultados simulados para as propriedades obtidas dos corpos de prova, uma vez que esses corpos de prova e as geometrias testadas foram impressas utilizando-se as mesmas configurações de impressão, o mesmo filamento e a mesma impressora.

Resultados muito positivos foram obtidos através da experimentação ao reduzir a duração das impressões e a massa das peças otimizadas, tendo como consequência ganhos financeiros muito relevantes uma vez que houve uma diminuição de 7% de material utilizado e economia de 9% no tempo de fabricação.

As divergências entre alguns resultados experimentais e simulados podem ser justificadas por inúmeras razões: a quantidade de corpos de prova utilizados para obter as propriedades do *PLA* pode não ter sido suficiente, visto que dois deles foram descartados por apresentarem comportamento muito diferente dos demais; a medição da flecha e da tensão deve ser feita de forma rigorosa e precisa, uma vez que a ordem de grandeza dos resultados é muito reduzida e qualquer desvio na posição do *strain gauge* e/ou do relógio comparador pode causar alterações significativas dos resultados; observou-se que, durante os experimentos, a forma como a peça era fixada na garra também impactava nos resultados finais medidos.

Apesar de alguns problemas enfrentados, a metodologia utilizada obteve êxito em comprovar os efeitos positivos da otimização topológica ao reduzir o tempo de fabricação e ao diminuir a massa da geometria, concentrando-a apenas nas regiões mais solicitadas, por meio do preenchimento inteligente e utilização do critério de máxima tensão, e mantendo a geometria externa inalterada. Ainda que a flecha tenha aumentado consideravelmente, o efeito já era esperado visto que não foi utilizado o critério de rigidez do material.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, V. S.; SIMONETTI, H. L.; NEVES, F. Seleção de topologias ótimas de estruturas. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, v. 30, p. 69-76, Abril 2014. ISSN 0213-1315.

ASTM. Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics. [S.l.].

BUENO, A. CONTRIBUIÇÕES AO DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS SOB MEDIDA UTILIZANDO ENGENHARIA REVERSA E MANUFATURA ADITIVA. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 159. 2012.

DILBEROGLU, U. et al. The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, Modena, v. 11, p. 545-554, Junho 2017. ISSN 2351-9789.

PORTO, T. M. S. Estudo dos avanços da tecnologia de impressão 3D e da sua aplicação na construção civil. UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA. Rio de Janeiro. 2016.

RAYNA, T.; STRIUKOVA, L. From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 102, p. 214-224, Setembro 2015.

SHAHRUBUDIN, N.; LEE, T. C.; RAMLAN, R. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. *Procedia Manufacturing*, v. 35, p. 1286-1296, Março 2019. ISSN 2351-9789.

SIGMUND, O.; BENDSOE, M. P. *TOPOLOGY optimization: theory, methods, and applications*. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Springer, 2003.

ZHAI, Y.; LADOS, D.; LAGOY, J. Additive Manufacturing: Making Imagination the Major Limitation. *JOM*, v. 66, p. 808–816, Março 2014.