

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL: ESTUDO DE CASO E ANÁLISE COMPARATIVA EM FLEXÃO

Marcelo de Jesus Cevey Ozorio

Marco Antônio Luersen

Neri Volpato

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, 5000, 81280-340, Curitiba, Paraná, Brasil

marcelocevey@gmail.com

luersen@utfpr.edu.br

nvolpato@utfpr.edu.br

Resumo. Com o advento e popularização das impressoras 3D, a manufatura aditiva (AM) tornou-se uma tecnologia importante na produção de protótipos e de produtos finais. Isso devido à sua versatilidade em obter geometrias complexas sem necessidade de procedimentos e ferramental exigidos nos processos convencionais de fabricação. Nesse contexto, a otimização estrutural de componentes concebidos por AM torna-se fator importante, tendo em vista que os mesmos estarão sujeitos a esforços que podem comprometer a vida útil e também que a quantidade de material influencia no custo final das peças. O estudo de resistência de componentes obtidos por AM é ainda pouco explorado devido à complexidade em relacionar as variáveis de fabricação e cálculos estruturais. A otimização topológica (TO) encontra a melhor distribuição de material em uma peça, de modo a manter sua integridade estrutural quando submetida a determinado tipo esforço. Sendo assim, o presente trabalho busca otimizar topologicamente uma peça, fabricá-la por manufatura aditiva por extrusão de material e avaliar o seu comportamento mecânico através de ensaios de flexão. Peças com formato original (sem otimização) foram fabricadas com redução de massa através de preenchimentos tipo celulares. Os resultados indicam que, para a mesma massa, a peça obtida por TO apresenta uma resistência à flexão bem superior às peças obtidas por redução de massa no preenchimento, além de redução de tempo de fabricação.

Palavras chave: Otimização Topológica. Manufatura Aditiva. Ensaio de Flexão.

1. INTRODUÇÃO

Os elevados custos dos processos convencionais na indústria relacionados com ferramental, estoques e mão de obra, por exemplo, dão oportunidade para novas soluções na fabricação de produtos de maneira geral. A praticidade e capacidade de obtenção de geometrias complexas em um único processo faz da manufatura aditiva (AM, do inglês *additive manufacturing*) um caminho promissor para a indústria.

A AM pode ser definida como um processo de fabricação com base em dados de um modelo tridimensional (3D), por adição de material geralmente de camada a camada, de maneira oposta ao método por remoção de material. A AM utiliza diferentes tipos de material, como cerâmica, polímero, metais e compósitos. Independentemente do tipo de material escolhido, o processo inicia por um modelo geométrico 3D da geometria pretendida, que é processada pelo software de planejamento de processo, que basicamente fatia a estrutura e determina o caminho de impressão. A partir das coordenadas obtidas, o material é depositado camada a camada e a peça é formada sem necessidade de moldes e fixações.

O estudo de resistência e funcionalidade de componentes otimizados obtidos por AM é ainda pouco explorado em projetos de engenharia devido à grande complexidade em relacionar as variáveis de fabricação do modelo e cálculos estruturais de otimização. Para tal, este trabalho se propõe a obter resultados de rigidez a flexão de uma peça utilizando técnica de TO, e comparar com estruturas celulares de preenchimento, as quais podem ser obtidas de maneira rápida e simplificada no software de planejamento de processo.

2. MANUFATURA ADITIVA POR EXTRUSÃO DE MATERIAL

A AM, também popularmente conhecida como Impressão 3D tornou-se uma tecnologia popular aplicada à indústria para as mais diversas finalidades, destacando-se o processo de desenvolvimento de produtos (PDP).

O processo de AM por extrusão de material consiste em construir um modelo físico a partir da deposição de camadas de material extrudado (Hutmacher *et al.*, 2001, Volpato, 2007).

O primeiro processo comercial deste tipo foi o de modelagem por fusão e deposição (FDM) da Stratasys. No entanto, atualmente vários projetos de baixo custo e abertos baseados no princípio de extrusão de material podem ser encontrados.

2.1 Material ABS

Um material comum nesta tecnologia é o ABS (acrilonitrila butadieno estireno). Conforme Landi e Andrade (2003), o ABS é formado por um componente elastomérico e dois componentes termoplásticos amorfos. É um termoplástico rígido, com boa resistência ao impacto, possui uma leve flexibilidade quando comparada a outros termoplásticos rígidos, permitindo uma pequena deformação da peça, dependendo da sua geometria. Este também é resistente a temperaturas mais altas, comparado ao PLA, por exemplo.

Observa-se que a orientação de impressão nas tecnologias de extrusão de material é um fator importante a ser levado em conta no planejamento de processo, uma vez que influencia na resistência mecânica do componente, devido à anisotropia característica do processo (orientação da deposição de material e do empilhamento das camadas). Para Volpato e Silva (2017), na AM em alguns casos existem direções preferenciais de processamento no plano XY, afetando assim a anisotropia do material. A anisotropia é mais evidenciada no eixo de construção Z, onde ocorre a adesão entre camadas, como pode ser visto na Figura 1. Ainda segundo os autores, a delaminação demonstrada na Figura 1(a) ocorre devido à orientação de fabricação, sendo assim, esta orientação possui uma menor resistência a flexão que a orientação da Figura 1(b), considerando o carregamento analisado. Além da orientação de fabricação da peça, os parâmetros de fabricação de cada tecnologia AM podem ser utilizados de maneira que reduzam a anisotropia da peça fabricada.

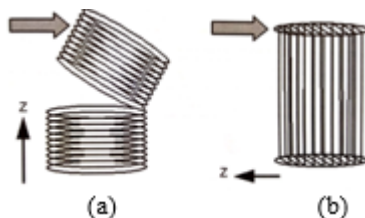


Figura 1. Representação do efeito da aplicação de uma solicitação transversal (a) e longitudinal (b) à direção Z de adição de camada, em função da anisotropia do material (Volpato e Silva, 2017)

2.2 Estruturas celulares

Para Gibson, Rosen e Stucker (2010), materiais celulares agregam na AM o conceito de depositar material somente quando for necessário para uma aplicação específica. Ramalho (2012) cita também que materiais celulares são compostos por unidades celulares com arranjo bidimensional, ou tridimensional (espumas) formada por filamentos ou faces interconectadas. São encontrados na natureza, como por exemplo a cortiça e o tecido ósseo esponjoso, ou podem ser produzidos industrialmente por meio de polímeros, metais e cerâmicas. Esses materiais podem fornecer boas características de absorção de energia, bom isolamentos térmico e acústico e aumento de resistência à tração e flexão.

2.3 Otimização topológica

Métodos de otimização são empregados em projetos de engenharia com o intuito de encontrar configurações que otimizam o desempenho segundo algum critério. Segundo Kiyono (2008), existem três tipos de otimização: otimização paramétrica, otimização de forma e TO. A TO apresenta bom desempenho na redução de massa e aumento de rigidez se comparado aos outros métodos, uma vez que não apresenta alguns problemas presentes nos outros dois tipos de otimização citados.

Para Rezaie, *et al.* (2013), a TO é uma ferramenta matemática utilizada no estágio de projeto, com o objetivo de reduzir o peso do componente projetado fazendo que a massa seja distribuída de forma otimizada no corpo. Para sua aplicação, é necessário definir a função objetivo, bem como as restrições do projeto.

Liu, *et al.* (2018) abordam a AM e TO, e citam que a possibilidade de obtenção de geometrias complexas pela AM é um fator promissor, tendo em vista as limitações para obtenção de tais geometrias por processos convencionais. Os autores ainda citam a anisotropia característica de peças obtidas por AM, para o estudo de TO, as propriedades mecânicas devem ser analisadas e quantificadas, ferramentas estatísticas de média e desvio padrão podem ser calculados para cada propriedade. Assim, as propriedades do material na TO resultam em soluções mais robustas e confiáveis.

A viabilidade do projeto otimizado deve ser confrontada com a possibilidade de fabricação, pois, para alguns casos, o resultado da TO precisa ser revisto em termos de formato, uma vez que seria impossível conceber a geometria gerada por meios convencionais. Como resultado, a peça fabricada pode não atingir o desempenho para o qual foi projetado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais utilizados

As peças analisadas no presente trabalho foram fabricadas em ABS, fornecido pela empresa 3D Prime, em rolo de 500g na cor branca, aproximadamente 200m de comprimento armazenado com sílica gel para evitar excesso de umidade. O filamento possui diâmetro 1,75mm, compatível com a impressora de extrusão de material utilizada, com variação de $\pm 0,02\text{mm}$, segundo informações do fabricante.

Na fabricação de todos os corpos de prova foi utilizada a impressora 3D Anycubic I3 Mega. Ela tem como princípio de fabricação a extrusão de material, possui um bico extrusor, mesa aquecida (capacidade até 120°C), bico com diâmetro de 0,4mm e capacidade de impressão de alturas de camada de 0,1mm até 0,4mm.

3.2 Procedimento de calibração da impressora

O software utilizado para configurações de parâmetros de processo foi o Cura versão 3.4.1. Trata-se de um software aberto com liberdade de definições de vários parâmetros de processo. A impressora foi calibrada visando obter peças com uma precisão dimensional próxima do modelo geométrico.

Para ajuste do parâmetro *gap*, foi modificado no software Cura a fluidez de material para 110%, ou seja, foi adicionado 10% a mais de material na deposição do preenchimento tipo *raster*, de modo a diminuir a distância entre um filamento e outro. Para os demais parâmetros, foram utilizados os recomendados para o material ABS, sendo estes detalhados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para impressão dos corpos de prova

Parâmetro	Valor
Altura de camada	0,2 mm
Quantidade de contornos	2
Percentual de preenchimento (<i>Gap</i>)	100% (<i>Gap</i> = 0)
Temperatura de impressão	220°C
Temperatura da mesa	110°C
Velocidade de retração	55 mm/s
Distância de retração	5 mm/s
Vel. de impressão	40 mm/s
Vel. de impressão da camada inicial e final	20 mm/s
Brim	8 mm
Flow	110%

3.3 Obtenção das propriedades do ABS por ensaio de tração

As propriedades de material foram obtidas por ensaio de tração padronizado para polímeros conforme norma ASTM D-638, com doze corpos de prova (quatro em cada orientação de preenchimento – ângulo de *raster*) fabricado em orientações de 0° , 90° e 45° , com a mesma orientação em todas as camadas, com parâmetros de fabricação idênticos. O objetivo foi de obter as propriedades relacionadas a módulo de elasticidade do material (E) nas direções 1 e 2, coeficiente de Poisson, tensão de ruptura conforme orientação e módulo de cisalhamento ou rigidez (G).

Os ensaios mecânicos foram realizados em ambiente com temperatura controlada em 23°C , a máquina utilizada para os ensaios é uma EMIC DL 23-100, juntamente com seus acessórios, sendo estes um extensômetro digital e dispositivo para ensaio de flexão de três pontos.

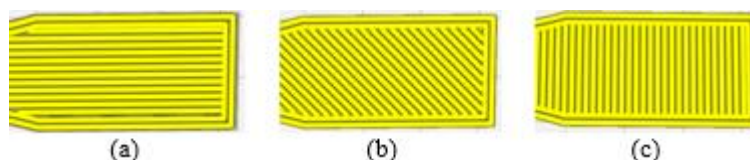


Figura 2. Modelo obtido no software Cura, para diferentes orientações: (a) 0° , (b) 45° , c (90°)

3.4 Procedimento para TO

Para encontrar a geometria ótima da peça por TO, foi utilizado o software Autodesk Fusion 360. Foram produzidos doze corpos de prova: quatro para 50% preenchimento triangular (Figura 3b), quatro com 50% preenchimento *tri-hexagon*

(Figura 3c), e quatro para otimização topológica com 50% de massa (Figura 3d) e 100% de preenchimento. Todos os percentuais de preenchimento são relacionados a peça inicial Figura 3(a).

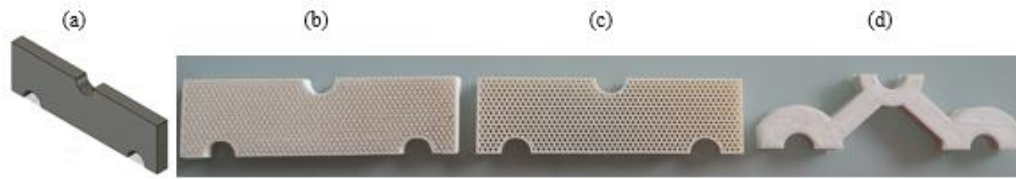


Figura 3. Peça inicial (a) e corpos de prova com: estrutural triangular e 50% de preenchimento (b), estrutural tri-hexagon e 50% de preenchimento (c) e otimizado via TO com 50% da massa original (d).

Para fins desta pesquisa, a otimização topológica é realizada considerando o material isotrópico, tendo em vista que a anisotropia é evidenciada na deposição de material no eixo Z. Na peça fabricada por otimização topológica foi utilizado 100% de preenchimento, ao passo que nas outras utilizou-se redução percentual de preenchimento de 50%. As peças são solicitadas por flexão na direção de empilhamento das camadas, sendo assim, a anisotropia é de difícil caracterização e aplicação no método de otimização. O valor do módulo de elasticidade foi obtido pelo valor médio apresentado nos ensaios (curva tensão-deformação). Os demais valores foram obtidos relacionando os eixos x e y com a orientação de deposição. O presente estudo está fundamentado na análise do peso final das peças e sua rigidez a flexão.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Propriedades do ABS

A Figura 4 mostra a tensão média para cada orientação dos corpos de prova submetidos a tração, para caracterização do material ABS, sendo que a tensão máxima de ruptura e o módulo de elasticidade do material obtido pela linha de tendência entre as três configurações são utilizados no processo de otimização topológica da peça.

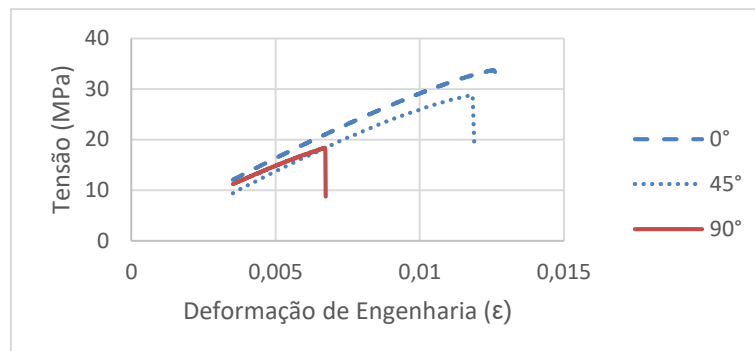


Figura 4. Diagramas tensão-deformação para três orientações de deposição (valores médios).

4.1 Procedimento de otimização topológica

A otimização topológica teve como base as propriedades do ABS obtidas pelo ensaio citado na seção 3.3. A função objetivo é de maximizar a rigidez a flexão com redução de massa percentual em 50% da forma inicial. A geometria obtida após a TO foi tratada no software Fusion 360. A geometria obtida por TO pode ser vista na figura 3(d).

4.2 Ensaio de flexão de três pontos

Os diferentes tipos de preenchimento do projeto inicial e otimizado topologicamente foram avaliados em ensaios de rigidez à flexão (Figura 5), visando analisar o comportamento mecânico do material até a ruptura.

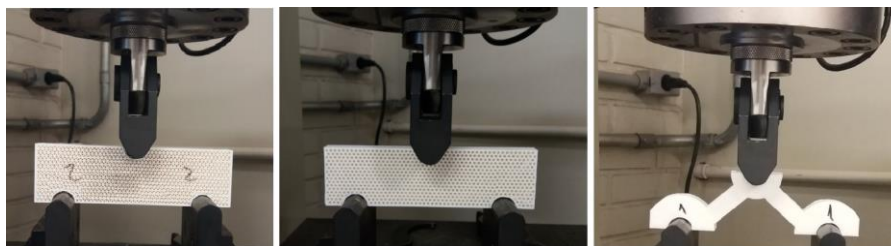


Figura 5. Ensaio de flexão de três pontos em peça com preenchimento triangular, tri-hexagon e otimização topológica.

Os resultados obtidos nos ensaios dos corpos de prova podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2. Resultado dos ensaios de flexão dos corpos de prova

Tipo de Otimização	Tempo de fabricação (Horas)	Massa (Gramas)	Resistência à Flexão (Newtons)
Triangular 50%	2,8	27,39	1873,7
Tri-Hexagon 50%	2,7	27,60	2079,7
Otimização Topológica	2,1	27,40	3884,8

Com base nos resultados, verificou-se que a relação massa vs. rigidez apresentou melhores resultados na peça obtida via otimização topológica. Apesar da otimização topológica ser um método desenvolvido inicialmente para aplicação em estruturas isotrópicas, para o caso da AM por extrusão de material se mostrou eficiente para o tipo de esforço que foi aplicado.

A anisotropia causada pela AM por extrusão de material é evidenciada no plano de empilhamento das camadas, porém, o ensaio foi realizado com aplicação de força paralela as camadas, no plano em que estavam dispostas, em um empilhamento de $[\pm 45^\circ]$.

Verifica-se que a otimização topológica é relevante e na resistência da peça fabricada, uma vez que suportou duas vezes mais carga, como visto na Tabela 2 se comparado a estruturas celulares utilizadas no preenchimento com o intuito de redução do mesmo percentual de massa da peça original. Além disso, a otimização topológica se mostrou eficiente no que se refere ao tempo de fabricação, sendo o menor dentre os experimentos realizados.

Sendo um fator de discussão pela falta de previsão do comportamento anisotrópico de peças fabricadas por AM submetidas a otimização de topologia, a mesma mostrou-se uma ferramenta promissora para fabricação de peças por extrusão de material tendo o quesito massa x rigidez, com aplicação de força paralela ao empilhamento de camadas.

A repetibilidade dos resultados com valores próximos de um ensaio para outro, mostram que o material tem um comportamento até certo ponto previsível se tomados cuidados com padronização de parâmetros de processo e direção da aplicação da carga, sendo recomendado aplicação de carga no sentido paralelo ao empilhamento, sendo que a aplicação de cargas tridimensionais não foi alvo do presente estudo.

O preenchimento por estrutura tri-hexagon se mostrou mais eficiente que o triangular para os parâmetros citados na Tabela 2. Deve-se levar em conta que a variação dos parâmetros de processo, como por exemplo, espessura do contorno, ângulo de raster e temperaturas, podem alterar completamente os resultados.

Para futuros estudos, pode-se combinar a otimização topológica com o preenchimento tipo tri-hexagon em diferentes percentuais de modo a melhorar ainda mais o processo na questão massa x rigidez com redução no tempo de fabricação.

5. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos, percebe-se que a otimização topológica é um ferramenta eficiente e com campo de aplicação e estudo para a AM por extrusão de material. Tal assunto ainda é pouco explorado devido a anisotropia do processo estudado, porém esta pode ser reduzida com parâmetros de processo adequado e orientação de aplicação da peça com forças aplicadas no plano paralelo a deposição de material.

O presente estudo mostrou a importância da relação entre as características mecânicas de um material para AM e a definição e padronização de parâmetros de processo na fabricação de peças.

A relação massa x rigidez à flexão teve um resultado significativo a favor da TO do que somente a redução do preenchimento da peça original. É nítida a eficiência da TO também na relação resistência x tempo de fabricação.

Os resultados do presente estudo abrem campo para a evolução do conceito de TO aplicada à AM em extrusão de material, assim como o estudo da obtenção de peças para uso fim na indústria em geral.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM D638 –Standard test method for tensile properties of plastics, v. 08.01 (2000).
- Gibson, I., Stucker, B.; Rosen, D. W. Additive manufacturing technologies. New York: Springer, 510p., 2010.
- Hutmacher, D. W.; Schantz, T.; Zein I.; Woei, K.; Teoh, S. H.; TAN, K. C., Mechanical properties and cell cultural response of polycaprolactone scaffolds designed and fabricated via fused deposition modeling. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, v. 55, n. 2, p. 203-216, 2001.
- Kiyono, César Yukishigue. Método de otimização topológica aplicado ao projeto de sonotrodos para transdutores piezelétricos. 2008. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Landi, T; AndradE, L. G. Estudo do efeito da radiação ionizante com feixe de elétrons sobre terpolímero Acrilonitrila Butadieno Estireno-ABS. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, v. 4, n. 4, 2003.
- Liu, Jikai et al. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, v. 57, n. 6, p. 2457-2483, 2018.
- Ramalho, E. G. Análise do comportamento mecânico de espumas cerâmicas a base de alumina obtidas pelo método da réplica. Tese de Doutorado (Pós Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal 2012. 104 p.
- Rezaie, R.; Badrossamay, M.; Ghaie; A.; Moosavi, H.. Topology optimization for fused deposition modeling process. *Procedia CIRP*, v. 6, p. 521-526, 2013.
- Volpato, N.; Ahrens, C. H.; Ferreira, C. V.; Petrush, G.; Carvalho, J.; Santos, L. R. J., Silva, J. V. L. Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações. São Paulo: 2007. 266 p.
- Volpato, N.; Silva, J.V.L Carvalho, J.; Santos, L. R. J., Munhoz, A. L. J., Costa, C.A., Ahrens, C.H., Foggiatto, J.A., Lima, M.S.F. Manufatura aditiva: tecnologia e aplicações da impressão 3D. São Paulo: Blucher, 2017. 400 p.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

TOPOLOGICAL OPTIMIZATION AND ADDITIVE MANUFACTURING BY MATERIAL EXTRUSION: CASE STUDY AND COMPARATIVE ANALYSIS IN BENDING

Abstract. *With the advent and popularization of 3D printers, additive manufacturing (AM) has become an important technology in the production of prototypes and final products. This is due to its versatility in obtaining complex geometries without the need of procedures and tooling required in conventional manufacturing processes. In this context, the structural optimization of components designed by AM becomes an important factor, considering that they will be subject to loads that can compromise its life and also that the amount of material influences the final cost of the parts. The study of the resistance of components obtained by AM is still little explored due to the complexity in relating the manufacturing variables and structural analysis. Topological optimization (TO) finds the best distribution of material in a part, in order to maintain its structural integrity when subjected to a certain type of loads. Thus, the present work seeks to optimize topologically a part, build it by additive manufacturing by extrusion of material and evaluate its mechanical behavior through flexural tests. Parts with the initial shape (no optimized) are manufactured reducing their mass through cellular type fills. The results indicate that, for the same mass, the part obtained by TO presents a flexural strength well superior to the parts obtained by reduction of mass through cellular fill and, further, reduction of manufacturing time.*

Keywords: *Topological Optimization, Additive Manufacturing, Flexural test.*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.