

## OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA

Rhuan José Ribeiro Pereira<sup>1</sup> (IC), Guilherme Ferreira Gomes (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá

**Palavras-chave:** Ensaios Mecânicos. Impressão 3D. Manufatura Aditiva. Otimização Multiobjetivo.

### Introdução

O crescimento da utilização da manufatura aditiva em diversos setores é um fato. Diferentes pesquisas revelam sua implementação em áreas como: saúde e próteses; otimização estrutural e numérica; e também industrial e construção.

A utilização de manufatura aditiva simplifica o processo de fabricação de próteses e outras peças, bem como promove uma melhor relação peso, custo e propriedades mecânicas da peça fabricada, segundo Farah Syazwani Shahar et al., (2019) e Robbie Brack et al., (2021).

O presente estudo aborda uma lacuna a ser explorada no tocante à otimização de parâmetros em manufatura aditiva, a fim de contribuir para o desenvolvimento do ramo da manufatura aditiva. Com o intuito de otimizar o processo de impressão 3D, a pesquisa procura modelar e parametrizar o processo de impressão 3D. Para tal obteve-se um planejamento de experimentos a partir de dados do processo e respostas a serem otimizadas. Com isso, realizar diferentes ensaios mecânicos de modo a se obterem propriedades otimizadas, encontrando assim parâmetros ótimos de impressão para diferentes casos.

### Metodologia

Inicialmente, foi feito um planejamento de experimentos (DoE), seguindo um arranjo fatorial ( $2^n$ , onde  $n$  é a quantidade de fatores do estudo). Graças ao DoE, foi possível medir respostas em todas as combinações dos níveis de fatores. No estudo, os fatores (parâmetros de impressão) foram definidos baseando-se em outros estudos, onde estão apresentados na Tabela 1.

Três ensaios mecânicos foram visados, necessitando assim de três corpos de prova (CDP) diferentes, o que totaliza 96 CDPs seguindo um DoE Fatorial Completo. Devido ao tempo e possíveis imprevistos, optou-se pelo DoE Fatorial Fracionado, utilizando apenas metade de um DoE completo. Para a obtenção de informações intermediárias, quatro experimentos foram adicionados com valores intermediários para cada fator estudado.

Uma vez impressos os corpos de prova, deu-se início aos ensaios mecânicos de tração, flexão e compressão, seguindo as normas ASTM D638-10 para tração e ASTM D695-10 para flexão e compressão. Terminado os ensaios, obtiveram-se diversas respostas experimentais, as quais foram submetidas à análise ANOVA (Análise de Variância – *Analysis of Variance*). Tal análise possibilita encontrar equações comportamentais de cada resposta experimental, permitindo traduzir o comportamento físico das respostas experimentais de acordo com os parâmetros estudados.

Posteriormente à ANOVA, realizou-se o processo de otimização das respostas em oito casos, visando sempre minimizar o tempo e o consumo de massa, e maximizar a propriedade mecânica estudada. Para a realização da otimização multiobjetivo, utilizou-se a técnica TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) (Hwang & Yoon, 1981) como técnica de tomada de decisão para a escolha da solução ótima dentre as centenas disponíveis na superfície de Pareto.

Tabela 1: Parâmetros e seus níveis considerados no processo.

Parâmetro	Unidade	Símbolo	Níveis	
			-1	+1
Espessura da Camada	mm	$x_1$	0,10	0,30
Velocidade de Impressão	mm/s	$x_2$	50	100
Densidade de Preenchimento	%	$x_3$	30	100
Padrão de Preenchimento	-	$x_4$	Gyroid	Tri-hexagonal
Material	-	$x_5$	PLA	ABS

A Figura 1 exemplifica os corpos de prova impressos no material PLA.

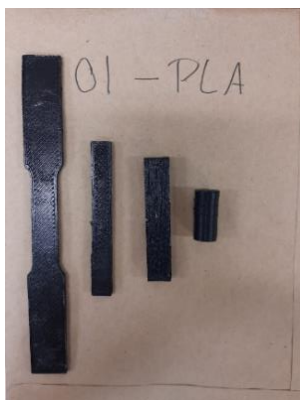


Figura 1: Exemplo de alguns corpos de prova impressos em PLA.

## Resultados e discussão

Como resultado, obteve-se primeiramente sobre as impressões, destacando-se as configurações usadas, qualidade de impressão bem como defeitos apresentados. Em seguida apresenta-se os ensaios mecânicos, onde foi possível extrair as respostas experimentais das curvas dos ensaios, apresentadas na Figura 2, para então prosseguir com a análise de variância e a otimização.

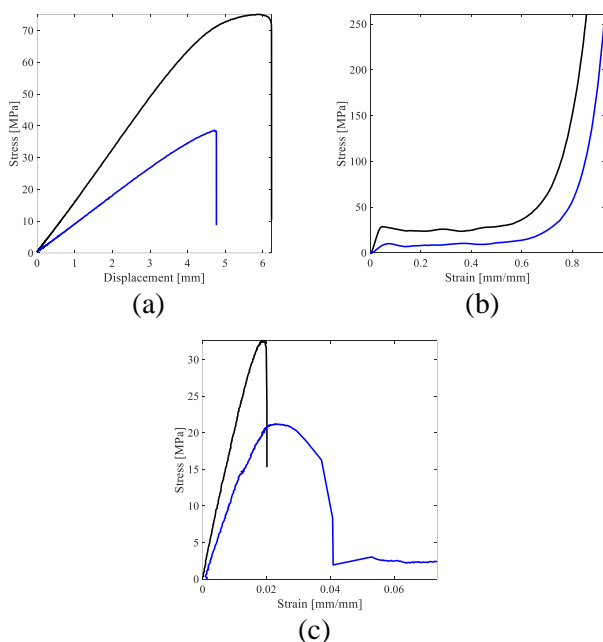


Figura 2: Resultados dos ensaios mecânicos. (a) ensaio de flexão. (b) ensaio de compressão. (c) ensaio de tração (legenda: — PLA, — ABS).

Ambos os corpos de provas possuem 0,1 mm de espessura de camada, 50 mm/s de velocidade de impressão e 30% de densidade de preenchimento. Porém, os corpos de prova em PLA (—) possuem o padrão de preenchimento Gyroid, enquanto os em ABS (—) possuem o Hexagonal.

Afirma-se, a partir das impressões, que o material PLA apresenta maior facilidade de impressão. Espessuras de camada reduzidas resultam em peças final com melhor qualidade superficial. Velocidades de impressão muito elevadas implicam em uma má deposição do material sobre a mesa e as camadas inferiores, gerando assim uma qualidade reduzida da peça final. O preenchimento de 100% resulta em peças mais fáceis de serem impressas e com maior qualidade final, porém aumentam significativamente o tempo de impressão e o consumo de material. Já o padrão de preenchimento não influencia na qualidade superficial, porém tem uma relação direta com as propriedades mecânicas da peça final. Vale ressaltar que fatores externos aos estudados neste trabalho também influenciam no resultado final.

A partir do arranjo fatorial, foi possível gerar uma equação comportamental para cada resposta experimental, relação dos efeitos principais, bem com os gráficos de Pareto. Verificou-se também, por meio da matriz de correlação, que maioria dos fatores estudados possuem uma correlação forte, entretanto os fatores tempo, massa e propriedades mecânicas não possuem essa correlação, podendo então realizar a otimização multiobjetivo sobre esses resultados, variando sempre a propriedade mecânica e gerando então oito casos ótimos.

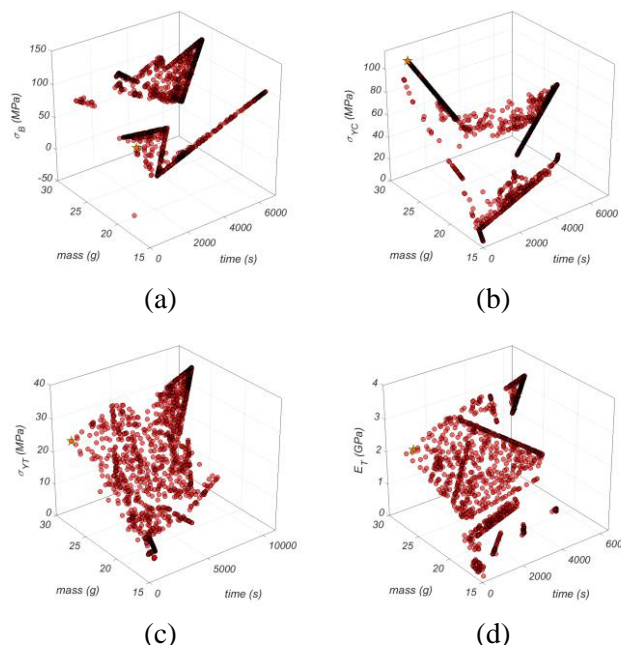


Figura 3: Resultado da otimização multiobjetivo considerando as propriedades mecânicas avaliadas, tempo de impressão e massa.

A Figura 3 representa quatro resultados de otimização, visando a minimização da massa e do tempo e a maximização das propriedades mecânicas, seguindo a seguinte ordem: (a) Tensão em flexão. (b) Tensão de

escoamento em compressão. (c) Tensão de escoamento em tração. (d) Módulo de elasticidade em tração.

A Tabela 2 apresenta os resultados da otimização multiobjetivo, ao qual foi escolhido somente um ponto dentre milhares possíveis seguindo a técnica TOPSIS.

Tabela 2: Resultados da Otimização Multiobjetivo.

Casos	Objetivos	Espessura da Camada	Velocidade de Impressão	Densidade	Padrão	Material	Resposta ótima 1	Resposta ótima 2	Resposta ótima 3
Caso 1 Flexão	Max( $\sigma_B$ ) Min(t) Min(m)	0,26	100	30	Hex	PLA	81,12	177,37	17,40
Caso 2 Compressão	Max( $\sigma_{YC}$ ) Min(t) Min(m)	0,30	50	100	Hex	ABS	115,57	251,25	27,00
Caso 3 Compressão	Max( $E_C$ ) Min(t) Min(m)	0,30	66,30	30	Gyroid	ABS	29,41	18,32	23,32
Caso 4 Compressão	Max( $U_{IC}$ ) Min(t) Min(m)	0,26	100	100	Hex	PLA	64,77	148,82	23,42
Caso 5 Compressão	Max( $U_{IC}$ ) Min(t) Min(m)	0,30	73,31	30	Hex	PLA	4,62	103,93	15,93
Caso 6 Tração	Max( $\sigma_{YT}$ ) Min(t) Min(m)	0,30	87,27	100	Gyroid	ABS	26,38	204,57	27,25
Caso 7 Tração	Max( $E_T$ ) Min(t) Min(m)	0,29	50	100	Hex	ABS	2,34	469,20	27,02
Caso 8 Tração	Max( $\sigma_T$ ) Min(t) Min(m)	0,30	87,10	100	Gyroid	ABS	44,65	222,30	27,26

## Conclusões

O presente trabalho analisou a significância estatística de diferentes parâmetros de impressão a partir de um planejamento de experimentos inicial. A partir das análises feitas, tais conclusões foram obtidas:

- Verificou-se que dez das doze respostas experimentais são significativas estatisticamente;
- A otimização multiobjetivo foi possível devido a correlação fraca das respostas de tempo e massa. Por outro lado, as respostas mecânicas apresentam uma forte correlação entre si;
- Em todos os casos a massa e o tempo foram significativamente otimizados (minimizados), e ao mesmo tempo as propriedades mecânicas foram maximizadas (otimizadas);
- Em relação às variáveis contínuas do processo (velocidade, espessura e densidade), os resultados obtidos ficaram dentro dos limites axiais do arranjo fatorial. Em alguns casos o ponto ótimo caiu na fronteira (*bounded point*), especialmente no tocante às variáveis de espessura (*layer thickness*) e densidade de preenchimento (*infill density*). O padrão predominante encontrado foi o do tipo hexagonal e o padrão giroide foi significativo em apenas três dos casos ótimos. Já no tocante ao material, os filamentos ABS e PLA se alternaram nas soluções ótimas,

dependendo da aplicação um material apresentará melhor desempenho do que outro. Vale ressaltar que estes casos foram obtidos em somente em um dos pontos dentre os 1000 possíveis das soluções não-dominadas. Possivelmente ao considerar pesos (importâncias) diferentes nos objetivos, outros parâmetros ótimos do processo entrariam em consideração.

Para um melhor entendimento da influência dos parâmetros de impressão sobre as propriedades mecânicas da estrutura final, bem como valores otimizados para atividades específicas, deve-se avaliar uma gama maior de parâmetros, uma vez que existem diversos (dezenas) parâmetros de impressão. Ficando então como sugestão para futuros trabalhos o estudo de outros parâmetros do processo de manufatura aditiva e a aplicação em estruturas mais complexas em um estado mais complexo de carregamento.

## Agradecimento

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

## Referências

- BRACK, R.; AMALU, E. H. A review of technology, materials and R&D challenges of upper limb prosthesis for improved user suitability. *Journal of Orthopaedics*, v. 23, p. 88-96, 2021;
- SHAHAR, F. S.; SULTAN, M. T. H.; LEE, S. H.; JAWAID, M.; SHAH, A. U. Md; SAFRI, S. N. A.; SIVASANKARAN, P. N. A review on the orthotics and prosthetics and the potential of kenaf composites as alternative materials for ankle-foot orthosis. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, v. 99, p. 169-185, 2019;
- HWANG, C.L.; YOON, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer-Verlag.