

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA EM MANUFATURA ADITIVA: ANÁLISE DO DIAGRAMA DE VORONOI EM PEÇAS DE ABS E PLA

Mauro Machado de Oliveira¹, Victória Guilhotti Magalhães²

1. Doutor em Tecnologia Nuclear, professor orientador, IFSP, Campus São Paulo, mauro.mo@ifsp.edu.br

2. Graduanda em Engenharia Mecânica, Bolsista FAPESP, IFSP, Campus São Paulo, guilhotti.m@aluno.ifsp.edu.br
(Tabela CNPq): 3.03.05.04-7 Polímeros, Aplicações

RESUMO: Este estudo investiga a aplicação do diagrama de Voronoi na otimização topológica de peças fabricadas por impressão 3D, com foco na eficiência de material e propriedades mecânicas. Foram projetados corpos de prova seguindo a norma ASTM D638, utilizando filamentos de ABS e PLA, e submetidos a otimização interna e externa por meio dos softwares Poretron e Meshmixer. Os resultados demonstram reduções de até 40% no consumo de material, com variações no tempo de impressão dependendo da complexidade geométrica: a otimização por Poretron aumenta o tempo de impressão, enquanto que por Meshmixer há uma queda de 12% no tempo. Ensaio de tração, no entanto, revelaram que houve perda significativa da resistência mecânica. Considerando que este é um ramo ainda pouco estudado, e que a redução de consumo de material é sempre um fator interessante, o trabalho realizado ainda se mantém relevante pelas informações obtidas e como um possível ponto de partida para que futuros pesquisadores possam procurar modelos alternativos utilizando o diagrama de Voronoi que possam, talvez, obter uma resistência mecânica desejável.

PALAVRAS-CHAVE: Manufatura aditiva, diagrama de Voronoi, otimização topológica, ABS, PLA.

TOPOLOGY OPTIMIZATION IN ADDITIVE MANUFACTURING: ANALYSIS OF VORONOI DIAGRAM EM ABS AND PLA PARTS

ABSTRACT: This study investigates the application of the Voronoi diagram in the topology optimization of parts manufactured by 3D printing, with focus on material efficiency and mechanical properties. Test subjects were designed according to norm ASTM D638, utilizing PLA and ABS filaments, and then subjected to internal and external optimization via the softwares Poretron and Meshmixer. The results present up to 40% material reductions, with printing times varying depending on geometrical complexity: the Poretron optimization increases printing time, while Meshmixer reduces it by 12%. Tensile testing, however, revealed that there was significant loss in ultimate tensile strength. Considering that this is under-studied field, and that the economy in material is always an interesting factor, the work done is still relevant for the information gained and as a possible jumping point so future researchers may look for alternative models utilizing the Voronoi diagram that may, perhaps, obtain a desirable tensile strength.

KEYWORDS: Additive manufacturing, Voronoi diagram, topology optimization, ABS, PLA.

INTRODUÇÃO

Definida pela ABNT como qualquer tecnologia que crie objetos físicos por adição de material com base em representação geométrica, a manufatura aditiva vem ganhando grande destaque no ramo industrial na última década. Nascida no ramo da prototipagem rápida, sua alta versatilidade geométrica e eficiência de material (Volpato, 2017) propiciaram o desenvolvimento da manufatura aditiva na automobilística, biomedicina, aeroespacial, e muitas outras indústrias.

Uma tecnologia da manufatura aditiva é a Impressão 3D, caracterizada pela deposição de camadas de filamento polimérico até a formação de um objeto tridimensional, a partir de um modelo criado por CAD (Volpato, 2007, APUD Ferreira, Kruger e Santos, 2016). Neste meio, surgem diversas técnicas para a otimização de tal processo, e um deles é o emprego do diagrama de Voronoi durante a modelagem de peças.

No espaço tridimensional, o diagrama de Voronoi divide os pontos geradores em poliedros convexos onde cada ponto dentro destas células é mais próximo do ponto gerador da mesma do que qualquer outro ponto gerador no espaço (Ying et al, 2015). Estas estruturas internas podem modificar as propriedades do material, possivelmente resultando em peças mais flexíveis (Martínez, 2016). Além disso, a criação de vazios no interior da peça reduz a quantidade de material e tempo de impressão.

O artigo aqui apresentado tem objetivo de melhor estudar tal processo, obtendo mais eficiência energética e de material. Ele procura estudar os efeitos da otimização por Voronoi em tais peças, procurando estabelecer se há um impacto positivo ou negativo nas propriedades mecânicas do material. Isso se dá pela criação de um corpo de prova, otimização do mesmo por Voronoi, e então avaliar seu comportamento diante de um ensaio de tração.

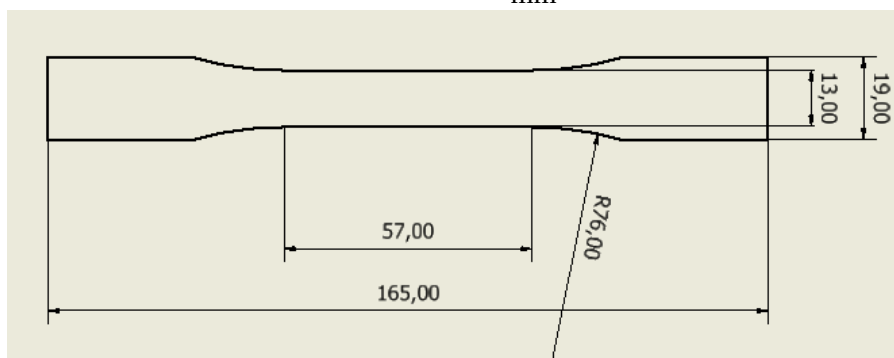
MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa se dividiu em três etapas: a primeira de revisão bibliográfica sobre manufatura aditiva e diagrama de Voronoi, a segunda na modelagem de padrões Voronoi em corpos de prova, e a terceira de manufatura e ensaio de tração dos corpos de prova produzidos.

A segunda etapa, de modelagem, foi realizada utilizando o software Autodesk Inventor para modelagem dos corpos de prova. A otimização por Voronoi foi realizada com programas específicos para tal, no caso, o Poretron do Voronoi Diagram Research Center e Meshmixer da Autodesk.

Com base na ASTM D638, que é a norma norte americana responsável por teste de tração em polímeros, foram desenhados três tipos de corpo de prova, todos com 3.5 mm de espessura, metade da máxima estipulada pela norma. A figura abaixo mostra o modelo-base dos corpos de prova, com as devidas cotas:

FIGURA 1. Desenho do modelo base de acordo com a ASTM, com as cotas em mm



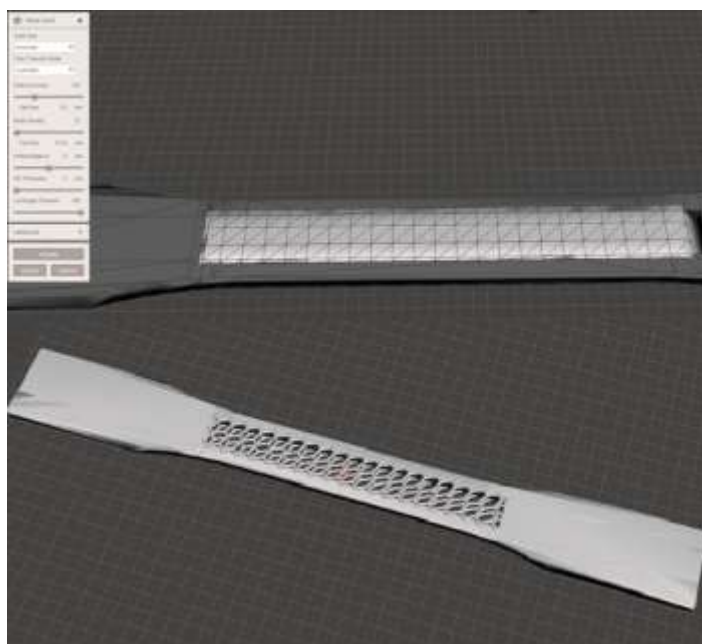
Para a otimização por Voronoi, foi utilizado o programa Poretron, que é disponibilizado gratuitamente pela instituição Voronoi Diagram Research Center. Para este caso, o programa faz uma otimização interna, no corpo todo. A única seleção possível é em qual direção as elipses serão geradas.

FIGURA 2. Modelo obtido pelo Poretron



Para a otimização por Meshmixer, que é uma otimização externa, o processo foi mais complicado. Primeiro, se isola a parte a ser otimizada; então, deve-se editar a malha triangular pela função “Make Solid”. Porém, ao se editar a malha, se alteram as dimensões do corpo. Uma malha mais larga, ou menos densa, “infla” o corpo, assim sendo necessários ajustes dos parâmetros “mesh density” e “object accuracy”, até que seja atingido um resultado satisfatório. Outra opção, se deseja a malha mais aberta possível, é aceitar a inflação do corpo e remover o excesso de material pela função “plane cut”.

FIGURA 3. Processo de obtenção do modelo por Meshmixer



De cada modelo, foram utilizadas dez cópias para o ensaio de tração, cinco de cada material. Para o PLA, não foi possível obter um modelo para o Meshmixer, pois a rede Voronoi obtida não se sustentava com o material. A figura 4 mostra os corpos de prova em ABS (o modelo-base, sem otimização, a otimização por Poretron e por Meshmixer), e então os mesmos modelos em PLA, da esquerda para a direita.

FIGURA 4. Corpos de prova obtidos



A fabricação foi executada utilizando a impressora Ender 6 da Creality, e o ensaio de tração foi realizado utilizando o equipamento F305 da Mark-10. Em relação aos filamentos, foram adotadas as fabricantes GTMax e 3DLab para o ABS e PLA, respectivamente. Os parâmetros de impressão foram mantidos os mesmos quando possível, apenas com variações de temperatura conforme as propriedades dos materiais:

TABELA 1. Parâmetros de impressão.

MATERIAL	TEMPERATURA DA MESA	TEMPERATURA DO FILAMENTO	VELOCIDADE DE IMPRESSÃO	ALTURA DA CAMADA
ABS	90 °C	230 °C	80 mm/s	0.2 mm
PLA	60 °C	215 °C		

O preenchimento do material de base para todos os casos foi de 100%, em padrão giroide.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

É importante analisar as diferenças entre tempos de impressão e massas obtidas. Os dados abaixo se baseiam todos em lotes de 5 peças, não no valor da peça única, pois é onde é possível melhor observar os impactos:

TABELA 2. Efeitos nos tempos de impressão e quantidade de material.

Corpo de prova	Modelo-base		Poretron		Meshmixer	
Material	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA
Massa (g)	50	56	32	37	41	-
Tempo (min)	288	327	422	462	256	-

Percebe-se que para este segundo caso, a otimização por Poretron aumenta, em muito, o tempo de impressão, devido ao percurso mais complexo da impressora. Porém, a priori, o resultado se mantém satisfatório pela redução drástica de material: uma redução de quase 40% de filamento é uma característica interessante, principalmente se considerando uma futura aplicação industrial.

Já a otimização por Meshmixer apresenta o melhor custo-benefício: apesar da redução de material ser bem menor, com pouco menos de 20%, o tempo de impressão apresenta uma redução de cerca de 12%.

Os corpos de prova obtidos então foram submetidos ao ensaio de tração. Como cada modelo e material foi submetido ao teste cinco vezes, a tabela abaixo representa as médias obtidas:

TABELA 3. Valores médios obtidos no ensaio de tração.

Corpo de prova	Modelo-base		Poretron		Meshmixer	
Material	ABS	PLA	ABS	PLA	ABS	PLA
Média (N)	1489,80	1592,50	667,20	685,60	852,60	-

Claramente, o processo de redução de material por Voronoi não é benéfico para o caso de peças onde é requisitado resistência à tração. Apesar das vantagens em relação ao peso e ao tempo de fabricação, a resistência à tração é praticamente perdida quando submetido a remodelagem aqui apresentada.

CONCLUSÕES

As otimizações por Poretron e Meshmixer apresentam vantagens e desvantagens: por um lado, há redução de material e tempo de fabricação; por outro, a resistência à tração é cortada pela metade. Na indústria mecânica, em geral, esta desvantagem já torna o resultado obtido inviável para a maioria das aplicações.

No entanto, o estudo aqui apresentado não perde seu valor. A obtenção destas informações por si só já é satisfatória; afinal, na indústria e na gestão de projetos, é tão importante se conhecer o que funciona quanto o que não funciona. Para empregos em que a peça não é submetida a cargas significativas, o diagrama de Voronoi pode ser empregada para a economia de material e redução de peso. Vale ressaltar que, a otimização por Voronoi, para a manufatura aditiva, ainda é um ramo muito pouco estudado.

Finalmente, é esperado que este estudo possa servir a futuros pesquisadores como um ponto de partida para a exploração do diagrama de Voronoi na manufatura aditiva, e talvez, a obtenção de modelos que consigam conciliar a economia de material com a conservação ou até melhora da resistência mecânica.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Victória Guilhotti Magalhães realizou a revisão bibliográfica, desenhou os modelos dos corpos de prova, executou a manufatura dos mesmos e redigiu o artigo aqui enviado.

Mauro Machado de Oliveira foi o professor orientador do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao professor M.M.O que nos apresentou a oportunidade desta Iniciação Científica e orientou o trabalho. Da mesma forma, agradecemos à instituição FAPESP, por financiar este projeto. Somos gratos aos engenheiros Flávio Augusto Luiz e Leandro da Silva Santos, da empresa Nova ND Tecnologia, por fornecer o espaço, equipamento, e realizar os ensaios de tração. E ao professor Rodrigo Rech do Instituto Federal de São Paulo e ao aluno de Engenharia Mecânica Nathan Polatto, da mesma instituição, por suas importantes orientações no processo de impressão 3D e operação das máquinas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D638 – 14**: Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/ASTM 52900**: Manufatura Aditiva – Princípios Gerais – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BAUMERS, Martin; HOLWEG, Matthias. On the economics of additive manufacturing: Experimental findings. **Journal of Operations Management**, vol 65, n. 8, p. 794-809. Dez. 2019. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joom.1053> Acesso em: 31 de março de 2025.

CHOI, Seunghwan; RYU, Joonghyun; LEE, Mokwon; CHA, Jehyun; KIM, Hyunwoo; SONG, Chanyoung; KIM, Deok-Soo. Support-free hollowing with spheroids and efficient 3D printing utilizing circular printing motions based on Voronoi diagrams. **Additive Manufacturing**, vol 35, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860420306266> Acesso em: 14 de abril de 2025.

FERREIRA, Gécica da Cruz; KRUGER, Thaisa Regina; SANTOS, Christiane Bischof dos. UTILIZAÇÃO DA IMPRESSÃO 3D NA MANUFATURA PARA OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS: UM ESTUDO DE CASO EM INDÚSTRIAS AUTOMOBILÍSTICAS. **Memorial TCC Caderno da Graduação – FAE Centro Universitário**, v. 2, n. 1, 2015. Disponível em: <https://cadernotcc.fae.edu/cadernotcc/article/view/148> Acesso em: 09 de abril de 2025.

GIBSON, Ian; ROSEN, David; STUCKER, Brent; KHORASAMI, Mahyar; Additive Manufacturing Technologies. 3ª edição. Suíça, Springer Nature Switzerland AG, 2021.

JARCZEWSKI, Rafael de Oliveira. **Segmentação de objetos para impressão 3D**. TCC em Ciência da Computação, Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2023. Disponível em: <https://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/riu/8530/1/Rafael%20de%20Oliveira%20Jarczewski%20-%202023.pdf> Acesso em: 12 de abril de 2025.

LEE, M. et al. Support-free hollowing for 3D printing via Voronoi diagram of ellipses. **Computer-Aided Design**, v. 101, p. 23–36, ago. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448518301362> Acesso em: 31 de março de 2025.

MARTÍNEZ, Jonas; HOMUS, Samuel; SONG, Haichuan; LEFEBVRE, Sylvain. Polyhedral voronoi diagrams for additive manufacturing. **ACM Transactions on Graphics (TOG)**, vol. 37, no. 4, p. 1 – 15. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3197517.3201343> Acesso em: 14 de abril de 2025.

MORANDINI, Moisés Miranda. DEL VECHIO, Gustavo Henrique. IMPRESSÃO 3D, TIPOS E POSSIBILIDADES: uma revisão de suas características, processos, usos e tendências. **Interface Tecnológica** -v. 17 n. 2, p 67 – 77. 2020. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/866/523> Acesso em: 31 de março de 2025.

OKABE, Atsuyuki; BOOTS, Barry; SUGIHARA, Kokichi; CHIU, Sung Nok; KENDALL, D. G. Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams. 2ª Edição. Chichester, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 2000.

SILVA, Antonio Luis Araujo de; FEITOSA, Amanda Duarte; ALBUQUERQUE, Ramses Moreira de; XAVIER, Amanda da Silva. MANUFATURA ADITIVA: CARACTERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO COM OS PROCESSOS DE PRODUÇÃO EXISTENTES. XVIII **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Maceió, 2018**. Disponível em: Acesso em: 11 de abril de 2025.

TERRA, Tainá Stempkowski; FRASNELLI, Beatriz Martins; JACQUES, Jocelise Jacques de; TEIXEIRA, Fábio Gonçalves. REVISÃO SISTEMÁTICA DE ESTUDOS SOBRE A SUSTENTABILIDADE DO PROCESSO DE IMPRESSÃO 3D. ENSUS 2024 – XII Encontro de Sustentabilidade em Projeto, Belo Horizonte, 2024. **Anais [...] Belo Horizonte: UFMG, 2024. P. 666 – 674**. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/256902/17.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Acesso em: 09 de abril de 2025.

VOLPATO, Neri. MANUFATURA ADITIVA: Tecnologia e aplicações da Impressão 3D. São Paulo, Brasil, Editora Edgard Blucher Ltda, 2017.

YING, Shen; XU, Guang; LI, Chengpeng; MAO, Zhengyuan. Point Cluster Analysis Using a 3D Voronoi Diagram with Applications in Point Segmentation. **ISPRS Journal of Geo-Information**, vol. 4, p.g 1480-1499. 2015. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/4/3/1480> Acesso em: 14 de abril de 2025.