

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA E DE
MATERIAIS

MARCELO DE JESUS CEVEY OZORIO

**ESTUDO DE CASO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E ESTRUTURAS
CELULARES APLICADAS À PEÇA OBTIDA POR MANUFATURA ADITIVA POR
EXTRUSÃO DE MATERIAL**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA
2020

MARCELO DE JESUS CEVEY OZORIO

**ESTUDO DE CASO DE OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA E ESTRUTURAS
CELULARES APLICADAS À PEÇA OBTIDA POR MANUFATURA ADITIVA POR
EXTRUSÃO DE MATERIAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais - PPGEM - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Mecânica dos Sólidos.

Orientador: Prof. Marco Antônio Luersen, Dr. Eng.
Coorientador: Prof. Neri Volpato, Ph.D.

CURITIBA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Ozorio, Marcelo de Jesus Cevey

Estudo de caso de otimização topológica e estruturas celulares aplicadas à peça obtida por manufatura aditiva por extrusão de material [recurso eletrônico] / Marcelo de Jesus Cevey Ozorio. -- 2020.

1 arquivo texto (84 f.): PDF; 2,01 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Título extraído da tela de título (visualizado em 05 ago. 2020).

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Curitiba, 2020.

Bibliografia: f. 81-84.

1. Engenharia mecânica - Dissertações. 2. Topologia - Otimização. 3. Impressão tridimensional. 4. Plásticos - Extrusão. I. Luersen, Marco Antônio, orient. II. Volpato, Neri, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 620.1

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba
Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271
Aluna de Biblioteconomia: Josiane Manguiera

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº 387

A Dissertação de Mestrado intitulada: **Estudo de Caso de Otimização Topológica e Estruturas Celulares Aplicadas à Peça Obtida por Manufatura Aditiva por Extrusão de Material**, defendida em sessão pública pelo Candidato **Marcelo de Jesus Cevey Ozorio**, no dia 10 de junho de 2020, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica E De Materiais, área de concentração: Mecânica dos Sólidos, linha de pesquisa: Mecânica dos Sólidos Computacional, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica E De Materiais.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marco Antonio Luersen - Presidente - UTFPR

Prof. Dr. Jonas de Carvalho - USP

Prof. Dr. Luciano Zart Olanyk - UTFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, **10 de junho de 2020**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me dar forças e saúde, para que possa dia a dia superar obstáculos e seguir em frente.

Agradeço ao meu amigo Marcus Eduardo Deckert *in memoriam*, por ter me apresentado o PPGEM e ter me incentivado a ingressar nele. Com certeza, onde quer que esteja, está orgulhoso por eu ter continuado apesar de tudo que tenha acontecido.

Agradeço aos meus pais, pela compreensão de eu ter passado este tempo morando longe, e pelo apoio, por maior que fosse a saudade.

Meu agradecimento aos meus irmãos pelo incentivo e pelo apoio no decorrer desta caminhada.

À minha esposa Mônica Cevey, agradeço a paciência, que apesar de algumas vezes eu ter de abdicar de alguns momentos para o cumprimento deste objetivo, manteve-se firme ao meu lado.

Aos amigos que fiz em Curitiba e na UTFPR, o meu muito obrigado, vocês fazem parte da minha história.

Agradeço ao Professor Marco Antonio Luersen e ao Professor Neri Volpato, pela paciência, sabedoria, pela orientação e pelo conhecimento transmitido, o qual mudou a minha vida.

“Deus é o dono de tudo. Devo a Ele a oportunidade que tive de chegar aonde cheguei. Muitas pessoas têm essa capacidade, mas não têm essa oportunidade. Ele a deu para mim, não sei por quê. Sei que não posso desperdiçá-la.” - Ayrton Senna

RESUMO

OZORIO, Marcelo de Jesus Cevey. **Estudo de Caso de Otimização Topológica e Estruturas Celulares Aplicadas à Peça Obtida por Manufatura Aditiva por Extrusão de Material**, Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 83 páginas, 2020.

Com o advento e popularização das impressoras 3D nos diversos segmentos industriais, a manufatura aditiva tornou-se uma tecnologia estratégica na produção de protótipos e produtos finais. Isso se deve à sua versatilidade em obtenção de geometrias complexas sem necessidade de procedimentos e ferramental exigidos nos meios convencionais. Nesse contexto, a otimização estrutural de componentes concebidos pela manufatura aditiva torna-se fator importante, tendo em vista que os mesmos estarão sujeito a esforços que podem comprometer a vida útil e também que o custo de material representa uma parcela considerável no valor final do componente. O estudo de resistência e funcionalidade desses componentes é ainda pouco explorado em projetos de engenharia devido à grande complexidade em relacionar as variáveis de fabricação com modelos de cálculo estrutural e de otimização. A otimização topológica encontra a melhor distribuição de material em um modelo físico, de modo a manter sua integridade funcional quando submetido a determinado tipo de esforço mecânico. Sendo assim, o presente trabalho busca otimizar topologicamente uma peça, fabricá-la por manufatura aditiva por extrusão de material e realizar a comparação com peças de diferentes tipos de preenchimento celular, fabricadas pelo mesmo princípio de manufatura aditiva, com o intuito da redução de massa em relação à uma peça inicial. O objetivo é avaliar e comparar o comportamento mecânico das peças fabricadas através de ensaios de flexão. De maneira a validar os resultados obtidos, modelos numéricos das peças fabricadas por manufatura aditiva foram submetidos a simulações por elementos finitos. Com base nos resultados, verificou-se que a otimização topológica obteve uma peça com melhor comportamento mecânico à flexão, quando comparada às peças com estruturas de preenchimento celular.

Palavras-chave: Otimização topológica, Manufatura aditiva, Preenchimento celular, AM por extrusão de material.

ABSTRACT

OZORIO, Marcelo de Jesus Cevey. **Case Study Of Topology Optimization and Cellular Structures Applied to Part Obtained by Additive Manufacturing via Material Extrusion**, Master Dissertation – Postgraduate Program in Mechanical and Materials Engineering, Federal University of Technology – Parana. Curitiba, 83 pages, 2020.

With the advent and popularization of 3D printers in various industrial segments, additive manufacturing has become a strategic technology for the production of prototypes and final parts. This is due to its versatility in obtaining complex geometries without the need of procedures and tools which are required in conventional techniques. In this context, the structural optimization of components obtained by additive manufacturing becomes an important factor, considering that they will be subject to mechanical efforts that can compromise the lifespan and also that the material cost represents an important part in the final value of the component. The study of strength and functionality of these components is still little explored in engineering projects due to the high complexity in relating the manufacturing variables with structural analysis and optimization models. Topology optimization finds the best material distribution in a physical model, in order to maintain its functional integrity when subjected to mechanical loads. Therefore, the present work seeks to topologically optimize a part, manufacture it by additive manufacturing via material extrusion and compare it with parts made with different filling structures patterns, obtained by the same additive manufacturing principle, in order to reduce mass in relation to an initial part. The objective is to evaluate the mechanical behavior of the manufactured parts through bending tests. In order to validate the results, numerical models of parts manufactured by additive manufacturing were simulated by finite elements. Based on the results, it was verified that the topology optimization obtained a part with a better bending mechanical behavior when compared to the parts with cellular filling structures.

Keywords: Topology optimization, Additive manufacturing, Cellular filling, AM via material extrusion.

LISTA DE SIGLAS

AM	Manufatura aditiva – <i>Additive manufacturing</i>
ABS	Acrilonitrila, butadieno e estireno
CAD	Projeto assistido por computador – <i>Computer-aided design</i>
CAE	Engenharia assistida por computador – <i>Computer-aided engineering</i>
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono - <i>Carbon fiber reinforced polymer</i>
FDM	Modelagem por fusão e deposição – <i>Fused deposition modeling</i>
FEA	Análise por elementos finitos – <i>Finite element analysis</i>
TCL	Teoria clássica da laminação
TO	Otimização topológica – <i>Topology optimization</i>
PDP	Processo de desenvolvimento de produto
PLA	Poliácido láctico
SIMP	<i>Solid isotropic material with penalization</i>
3D	Tridimensional

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades do ABS obtidas dos fabricantes.	40
Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova para calibração da impressora.	42
Tabela 3 - Parâmetros para impressão dos corpos de prova adotados pelo autor. ..	44
Tabela 4 - Propriedades do material ABS utilizadas no sistema CAD, obtidos experimentalmente pelo ensaio de tração uniaxial (Valores Médios).	49
Tabela 5 - Propriedades de malha.	51
Tabela 6 - Número de nós e número de elementos do FEA.	61
Tabela 7 - Módulos de elasticidade médios e seus respectivos desvios padrões e deformação máxima média do material ABS para as orientações de <i>raster</i> 0°, 45° e 90°	68
Tabela 8 – Análise numérica da peça sem To.	68
Tabela 9 - Valores médios e correspondentes desvios padrões obtidos nos ensaios de flexão das diferentes peças	71
Tabela 10 - Valores de deslocamentos máximos obtidos nos ensaios experimentais e via FEA das peças.	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Peça projetada por otimização topológica.....	16
Figura 2: Processo genérico para manufatura aditiva.....	21
Figura 3: Visão geral do processo AM.	21
Figura 4: Princípio de funcionamento o do processo FDM da Stratasys.	22
Figura 5: Etapas do Processo e do planejamento de processo da manufatura aditiva.	24
Figura 6: Descrição de parâmetros de processo da tecnologia FDM.....	25
Figura 7: Resistência à tração de corpos de prova de ABS em diferentes orientações.....	27
Figura 8: Diagrama Tensão – Deformação para componentes em FDM.	28
Figura 9: Representação do efeito da aplicação de uma solicitação transversal.	28
Figura 10: Componente fabricado por manufatura aditiva com estrutura celular.	30
Figura 11: Padrões de preenchimento e ensaio de flexão de três pontos.....	30
Figura 12: Comparação de métodos computacionais com o resultado experimental	31
Figura 13: Estrutura sanduíche com variações do tipo de preenchimento celular. ...	31
Figura 14: Solução de um problema por diferentes abordagens de otimização.....	33
Figura 15: Etapas de um problema de otimização topológica.	35
Figura 16: TO e seus resultados.	34
Figura 17: Estudo de otimização topológica com variação no preenchimento.	36
Figura 18: Comparação de métodos computacionais.	37
Figura 19: Rolo do material utilizado para impressão (ABS).....	40
Figura 20: Impressora 3D Anycubic i3 Mega.....	41
Figura 21: Máquina EMIC DL 23-100.....	41
Figura 22: Corpos de prova para ajuste dimensional e de fluidez.....	43
Figura 23: Sistema de nivelamento da mesa.	43
Figura 24: Dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM D-638.	45
Figura 25: Representação esquemática do ângulo de <i>raster</i> obtido no <i>software</i> Cura, para as orientações.....	45
Figura 26: Procedimento do ensaio de tração.....	46
Figura 27: Modelo geométrico do corpo de prova a ser otimizado (dimensões em mm).....	47

Figura 28: Definição dos apoios para realizar a otimização topológica no <i>software</i> Fusion 360.....	48
Figura 29: Aplicação de força para realizar a otimização topológica no Fusion 360.	49
Figura 30: Determinação da região a ser preservada durante a TO.	50
Figura 31: Malha utilizada para a TO.	51
Figura 32: Malha inicial para a TO no Fusion 360.....	52
Figura 33: Definição dos critérios para otimização topológica no Fusion 360.	53
Figura 34: Resultado final da otimização topológica.	53
Figura 35: (a) Resultado obtido da TO e (b) geometria tratada após o processo de TO.	54
Figura 36: (a) ângulo de <i>raster</i> de 45° e entre camadas de 90°, (b) Corpo de prova cuja geometria foi obtida da TO.	55
Figura 37: (a) Corpo de prova da peça com 50% de preenchimento triangular, (b) corpo de prova da peça com 50% de preenchimento <i>tri-hexagon</i>	56
Figura 38: Modelo da peça no formato inicial e suas propriedades de massa.....	56
Figura 39: Massa das peças fabricadas.....	57
Figura 40: Estratégia de preenchimento.	58
Figura 41: Peça híbrida.	58
Figura 42: Massa peça híbrida.	59
Figura 43: Peça inicial (a) e corpos de prova com: estrutural celular triangular e 50% de preenchimento (b), estrutura celular <i>tri-hexagon</i> e 50% de preenchimento (c) e otimizado via TO com 50% da massa original (d).	60
Figura 44: Ensaio de flexão de três pontos em peça.	60
Figura 45: (a) Peça desenhada com preenchimento triangular, (b) peça desenhada com preenchimento <i>tri-hexagon</i> , (c) peça desenhada com geometria obtida da TO.	61
Figura 46: Condições de apoio e aplicação de força para análise por FEA.	61
Figura 47: Tensões máximas em MPa, obtidas no ensaio de tração	63
Figura 48: Análise da fratura dos corpos de prova.....	64
Figura 49: Diagrama tensão – deformação dos corpos de prova em ABS com diferentes ângulos de <i>raster</i> de deposição de camadas.	65
Figura 50: Diagrama tensão – deformação média dos corpos de prova em ABS.....	66
Figura 51: Diagrama tensão – deformação comparativo entre as três orientações de deposição (valores médios), com linha de tendência em vermelho.	67

Figura 52: FEA da peça inicial em ABS com 100% de preenchimento.	69
Figura 53: Campo de deslocamento, obtido via FEA, da peça em ABS com 100% de preenchimento.....	70
Figura 54: Resultados da FEA da peça com preenchimento triangular.	73
Figura 55: Resultados da FEA da peça com preenchimento <i>tri-hexagon</i>	74
Figura 56: Resultados da FEA da peça obtida por TO.....	76
Figura 57: Resultados da FEA da peça híbrida.....	77

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTO.....	15
1.2	OBJETIVO E JUSTIFICATIVA	17
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	MANUFATURA ADITIVA.....	19
2.1.1	Processo AM por extrusão de material.....	22
2.1.2	Planejamento de Processo	23
2.2	CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS PEÇAS IMPRESSAS	25
2.3	ESTRUTURAS CELULARES	28
2.4	OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA.....	32
2.5	OPORTUNIDADE DE PESQUISA.....	37
3	MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	39
3.2	MÉTODOS	42
3.2.1	Procedimento de calibração da impressora.....	42
3.2.2	Procedimento para os ensaios de tração uniaxial	44
3.2.3	Procedimento de otimização topológica	47
3.2.4	Impressão dos corpos de prova (peças) otimizados.....	54
3.2.5	Corpos de prova (peças) com preenchimento celular	56
3.2.6	Corpo de prova (peça) Hibrida	58
3.2.7	Ensaio de flexão de três pontos	59
3.2.8	Análise de deslocamento por elementos finitos.....	60
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	63
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ABS	63
4.2	ANÁLISE NUMÉRICA DA PEÇA SEM TO	68
4.3	FLEXÃO DA PEÇA OTIMIZADA E PEÇAS COM PREENCHIMENTO CELULAR.....	70
4.4	ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DAS PEÇAS IMPRESSAS	72
5	CONCLUSÕES.....	79
	REFERÊNCIAS.....	81

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO

Os elevados custos dos processos convencionais na indústria, muitas vezes em função de uso de 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 (*additive manufacturing* - AM), ou também denominada de impressão 3D, um caminho promissor para a indústria. Além disso, a questão econômica e a exigência cada vez maior em relação à qualidade, resistência e confiabilidade trazem grandes desafios de engenharia em componentes cada vez mais leves e com elevada resistência mecânica.

A AM pode ser definida como um processo de fabricação com base em dados de um modelo tridimensional (3D), por adição de material camada a camada, de maneira oposta ao método por remoção de material. A AM pode utilizar diferentes tipos de materiais, e tecnologias sendo que no estudo será abordado a tecnologia de extrusão de materiais. Independentemente do tipo de material escolhido, o processo inicia por um modelo geométrico 3D da geometria pretendida, o qual é processado pelo *software* de planejamento de processo, que basicamente fatia a estrutura e determina o caminho de impressão. Seguindo este caminho, o material é depositado camada a camada e a peça é formada sem necessidade de moldes e fixações.

Rezaie et al. (2013) e Zhu, Zhang e Xia (2016) citam que o peso possui grande importância não só nos parâmetros que envolvem a fabricação de um produto, mas também no seu desempenho e vida útil. Componentes mais leves normalmente requerem menores custos de fabricação e manutenção, além de causarem menos impacto ambiental. Nesse contexto, a otimização topológica (*topology optimization* - TO) tem por objetivo encontrar a melhor distribuição de material em um projeto. Um exemplo de projeto submetido à otimização topológica pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Peça projetada por otimização topológica.



Fonte: Adaptado de Emmelmann, Sander e Wycisk (2011).

A TO, aliada à AM, consiste em um campo promissor a ser explorado, visto que uma peça mais leve que o projeto original pode ser obtida sem alterar sua funcionalidade inicial. No caso da AM, a redução de massa em uma peça tem relação direta com o processo, uma vez que utiliza-se menos material e menos tempo de fabricação. Essa redução de massa pode ser alcançada também variando percentuais de preenchimento da peça, definido no planejamento de processo. Quando o percentual de preenchimento interno é menor do que 100%, um material celular é gerado. É necessário o estudo desses dois métodos (TO e preenchimento interno celular) para que se possa verificar qual efetivamente possui melhor resultado quanto ao comportamento mecânico (resistência e/ou rigidez).

Quanto a aplicação de peças fabricadas por AM para o uso final, o desafio é ainda maior, tendo em vista que Volpato e Silva (2017 p. 325-341) citam que a caracterização dos materiais para cada tecnologia e suas propriedades mecânicas, exigidas para a utilização em ambientes específicos, ainda precisam ser mais exploradas. Assim, os responsáveis por projeto de componentes mecânicos de AM necessitam conhecer o comportamento mecânico dos materiais e suas propriedades mecânicas. Ainda segundo os autores, outra questão é que os profissionais que atuam em desenvolvimento de produto não foram capacitados para projetar para a AM, uma vez que a liberdade de obter geometrias complexas do processo não é explorada, sendo convencionalmente utilizado na indústria projetos tradicionais.

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 com modelos de cálculo

estrutural e de otimização. Com o intuito de contribuir nessa área, propõe-se aqui uma pesquisa quanto à obtenção de uma geometria de peça utilizando TO e a fabricação de peças celulares controlando o preenchimento interno.

1.2 OBJETIVO E JUSTIFICATIVA

O objetivo principal deste trabalho é realizar um estudo comparativo de respostas de ensaios mecânicos de flexão de peças fabricadas através da tecnologia de extrusão de materiais, quando aplicados conceitos de TO em conjunto com estruturas celulares, obtidas por diferentes tipos de preenchimento utilizando como matéria prima, o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno).

Como objetivos específicos pode-se citar:

- levantar as propriedades mecânicas médias a partir de ensaios de tração de corpos de prova, fabricados com diferentes ângulos de raster e com material ABS.
- realizar estudo comparativo da TO com o método de redução de massa por preenchimento na manufatura aditiva, utilizando estruturas de preenchimento com *raster tri-hexagon* e triangular;
- verificar o comportamento mecânico por elementos finitos para validar os resultados dos ensaios físicos.

Como justificativa, a AM é cada vez mais utilizada na produção de peças mecânicas complexas quando os métodos clássicos não são adequados ou deixam de ser vantajosos. Ferramentas de TO e análise por elementos finitos podem ser usadas para simular estruturas com formas complexas que atendam a restrições de projeto utilizando o mínimo de material possível. Combinando TO e AM, os resultados de engenharia e projeto de produto são promissores, uma vez que a AM tem a possibilidade de fabricação das geometrias complexas obtidas pela TO, o que não é possível a partir dos métodos de fabricação tradicionais, como a usinagem, por exemplo.

1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura a respeito dos assuntos mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, abrangendo os seguintes tópicos: manufatura aditiva, tecnologia por extrusão de material, planejamento do processo, materiais celulares, otimização topológica e material ABS. No Capítulo 3 são abordados os materiais e métodos empregados no desenvolvimento da dissertação. No Capítulo 4 são apresentados resultados, como a caracterização do material ABS quanto a suas propriedades mecânicas aplicadas na TO e as respostas em flexão dos casos testados. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros em continuidade à presente pesquisa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MANUFATURA ADITIVA

A Manufatura Aditiva (AM), ou também denominada de Impressão 3D, tornou-se uma tecnologia popular aplicada à indústria para as mais diversas finalidades. Segundo de Carvalho e Volpato (2007), o processo de desenvolvimento de produto (PDP) sofreu uma revolução devido ao aumento da concorrência e desenvolvimento tecnológico que elevaram a complexidade dos produtos fabricados. Para Saadlaoui et al. (2017), a principal vantagem da AM é a liberdade para projetistas em suas criações.

A AM evoluiu e passou de simplesmente um meio para obtenção de protótipos para um processo de fabricação complexo e altamente promissor no meio industrial. Atualmente, a AM é empregada em diversas áreas e produtos, com destaque para a indústria aeroespacial, médica, eletrônica, dentre outras. Para Khajavi, Partanen e Holmström (2014), a AM evoluiu para tornar-se cada vez mais um método comum de produção de peças finais. Assim, o estudo integrado desta tecnologia com demais áreas tais como, otimização de projetos, desenvolvimento de materiais é importante.

Segundo Gress e Kalafsky (2015), a economia mundial e a busca por conhecimento estão se modificando devido a popularização e incremento tecnológico, tendo a AM como um dos incentivadores. Além disso, os autores citam que o incentivo governamental e aporte financeiro industrial são fundamentais para a evolução da tecnologia, bem como a sua aplicação como uma ferramenta para suprir as condições industriais e humanas.

Como potencialidades e vantagens da utilização da AM pode-se citar (VOLPATO e de CARVALHO 2017, p. 23-27):

- liberdade geométrica de fabricação, ou seja, geometrias impossíveis de serem fabricadas por outros processos podem ser fabricadas por AM;
- o componente é fabricado do início ao fim no mesmo equipamento em uma única etapa do processo de fabricação;
- não são necessários cálculos complexos das trajetórias de ferramentas. Quando se trabalha com camadas planas, o planejamento da trajetória se restringe a um plano 2D;

Ainda conforme Volpato e de Carvalho (2017, p. 23-27), a tecnologia possui desvantagens, tais como:

- as propriedades dos materiais obtidos por AM não são as mesmas dos materiais processados de maneira convencional, devido à fabricação por camadas gerar propriedades anisotrópicas ao material;
- AM para uso específico industrial possui um custo elevado relacionado a aquisição e operação de equipamentos, além do elevado custo de materiais e insumos.

Para Gibson, Rosen e Stucker (2010), pode-se definir, de maneira genérica, o processo de AM em oito etapas, conforme Figura 2, sendo elas:

- 1) Modelo geométrico 3D a ser concebido;
- 2) conversão para o formato .STL (*STereoLithography*) que representa a geometria da peça por uma malha triangular fechada, sendo um arquivo utilizado e reconhecido na maioria dos equipamentos de AM. Este é um padrão *de facto*, i.e., não adotado como padrão por norma;
- 3) realização do planejamento de processo em *software* específico para a máquina que irá executar a impressão. Nesta etapa é possível manipular o arquivo conforme escala e orientação de impressão;
- 4) transferência de dados do planejamento do processo para fabricar o componente no equipamento;
- 5) fabricação da peça pelo equipamento, conforme parâmetros definidos nas etapas anteriores;
- 6) remoção da peça fabricada do equipamento é uma etapa que demanda interação entre máquina e operador.
- 7) Pós-processamento. É necessário em algumas peças, envolvendo atividades como por exemplo, o acabamento em regiões onde foram removidas estruturas de suporte, remoção de rebarbas, acabamento, pintura. É a etapa de trabalho minucioso se este for necessário para que a peça atinja suas especificações de projeto em acabamento superficial;
- 8) Peça final, pronta para ser aplicada ao objetivo do projeto.

Segundo Volpato e de Carvalho (2007, p. 1-14), na AM o modelo CAD é processado, passando por um fatiamento pelo *software* de planejamento de processo, gerando curvas de níveis 2D, que são responsáveis por definir a área

onde será necessário realizar o preenchimento de material da peça a ser fabricada. As camadas são processadas em sequência, concebendo a peça final pelo “empilhamento” destas, como esquematizado na Figura 3.

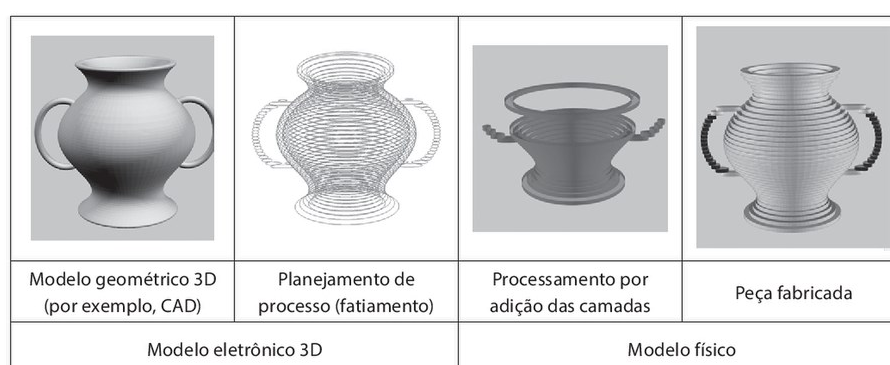
As principais diferenças entre as máquinas de AM estão nos materiais que podem ser usados e no princípio de adição de camadas.

Figura 2: Processo genérico para manufatura aditiva.



Fonte: Adaptado de Gibson, Rosen e Stucker (2010).

Figura 3: Visão geral do processo AM.



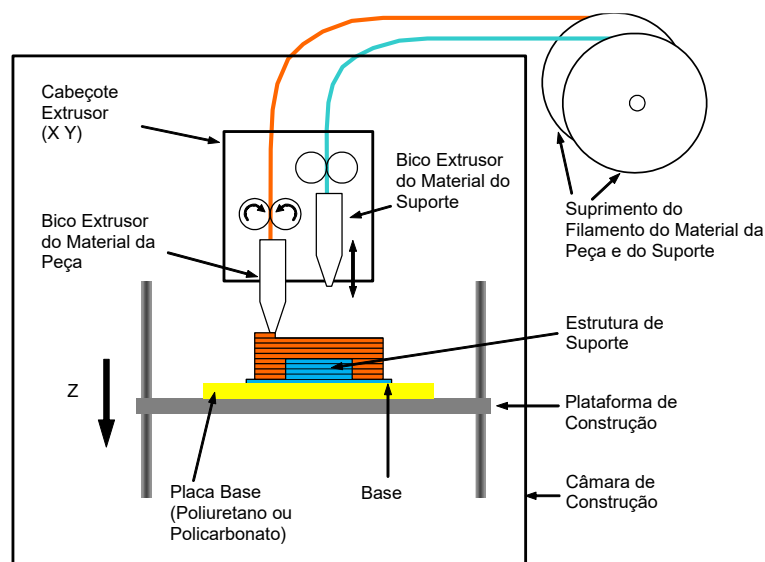
Fonte: Volpato e de Carvalho (2017).

2.1.1 Processo AM por extrusão de material

Atualmente, a tecnologia AM por extrusão de material é a mais popular e acessível, utilizando termoplásticos, sendo os mais comuns ABS (acrilonitrila butadieno estireno), PLA (poliácido láctico), dentre outros (LEARY et al., 2014).

Conforme Hutmacher et al. (2001), o princípio de adição desta tecnologia consiste em construir um modelo físico a partir da deposição de camadas de material termoplástico extrudado. A Figura 4 mostra, esquematicamente, o funcionamento da tecnologia de AM por extrusão de material denominado de FDM (*Fused Deposition Modeling*).

Figura 4: Princípio de funcionamento o do processo FDM da Stratasys.



Fonte: Volpato (2017).

O processo FDM, patenteado pela empresa Stratasys, difere-se do processo por extrusão de material de impressoras de baixo custo em alguns aspectos, sendo o mais relevante que o processo FDM possui dois bicos extrusores, um utilizado para material da peça e outro para material de base e estruturas de suporte (VOLPATO, 2017 p. 150-154). Um mecanismo levanta e baixa o bico de extrusão do suporte, permitindo assim, intercalar os dois bicos, e evitando que enquanto o bico de suporte não está sendo utilizado este entre em colisão com a última camada impressa da peça. Outro diferencial do equipamento FDM é uma câmara de fabricação enclausurada, que é mantida aquecida com o objetivo de melhorar a adesão entre camadas. A temperatura da câmara tem por objetivo também auxiliar

na redução de tensões que são geradas no resfriamento do filamento depositado, de modo a reduzir ao máximo deformações das peças durante a fabricação.

Al-Ghamdi (2019) cita que o processo por extrusão de material é influenciado diretamente pelo consumo de energia, massa do produto e tempo de processo. Sendo assim, a TO indiretamente tende a trazer também a otimização desses parâmetros além da redução do tempo de impressão, tornam o processo mais sustentável. Os parâmetros de processo são importantes para a AM, pois como será visto na Seção 2.1.2 e Seção 2.2, eles possuem influência direta sobre a anisotropia e resistência mecânica do material.

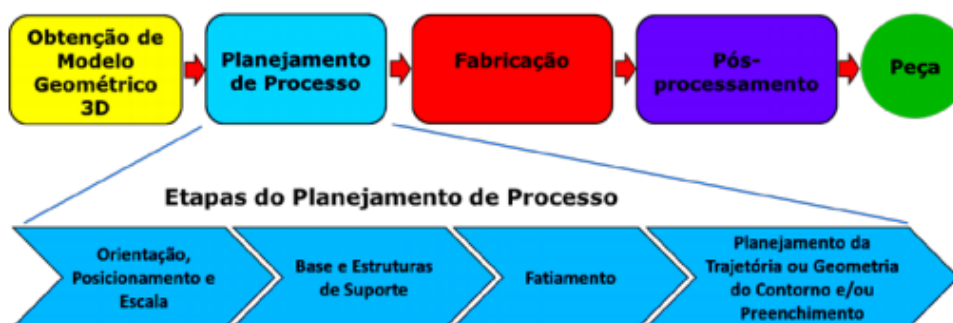
Volpato (2017 p. 150-154) cita que devido ao período de vigência de algumas patentes terem expirado, tecnologias abertas surgiram de iniciativas de pesquisa e desenvolveram equipamentos baseados na tecnologia FDM, dentre eles pode-se citar o projeto RepRap. Esse projeto utiliza como materiais o PLA e ABS e os equipamentos são disponibilizados em forma de *kits* de montagem, com valores mais baratos se comparados a *kits* já montados e testados.

2.1.2 Planejamento de Processo

O componente obtido por AM possui características mecânicas ligadas diretamente ao material e aos parâmetros de processo utilizados. Conforme Volpato (2017 p.145-175), o planejamento do processo se inicia com a orientação da geometria, posicionamento na mesa de construção, aplicação de escala, se necessário, cálculo da base e das estruturas de suporte, cálculo da trajetória ou geometria do contorno e/ou preenchimento das camadas e geração de dados a serem enviados à máquina. As etapas do processo, ilustrada na parte superior da Figura 5, podem ser repetidas até que o componente fabricado obtenha resultados satisfatórios, e o produto atenda às necessidades do projeto.

Conforme Rayegani e Onwubolu (2014), os parâmetros do processo devem ser ajustados antes do estágio de fabricação. Esses autores sugerem que as propriedades mecânicas dos componentes obtidos por AM são o resultado de vários parâmetros relacionados ao processo, e podem variar significativamente. Como as propriedades mecânicas são importantes para componentes funcionais, é essencial estudar a influência de vários parâmetros de processo em corpos de prova e peças teste.

Figura 5: Etapas do Processo e do planejamento de processo da manufatura aditiva.



Fonte: Volpato (2017).

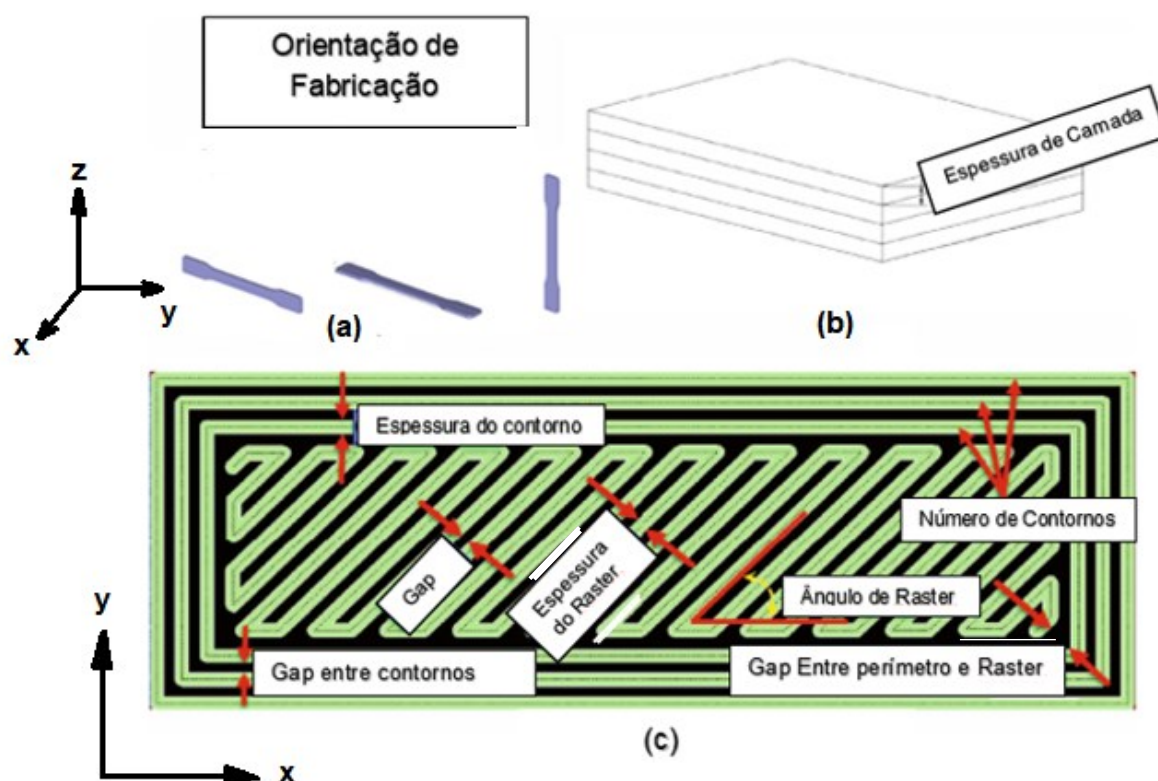
De modo a trazer uma maior aproximação da peça real obtida por AM ao projeto realizado em um *software* CAD, alguns parâmetros de máquina devem ser ajustados de modo a obter tolerâncias dimensionais aceitáveis e aspectos visuais aceitáveis às peças geradas no processo. Dados estatísticos e técnicas de otimização têm sido utilizadas com sucesso na definição dos parâmetros de processo de AM.

Conforme Mohamed, Massod e Bhowmik (2015), pode-se descrever alguns parâmetros de processo como:

- (i) **Orientação de Fabricação:** refere-se ao modo como a peça é orientada dentro da área de construção em relação aos Eixos X, Y, Z, conforme Figura 6 (a);
- (ii) **Espessura de Camada:** é a espessura da camada de material depositado (Figura 6 (b)). O seu valor depende: da distância entre bico e plataforma, do material, da temperatura de extrusão, do diâmetro do bico. Pode-se citar também a velocidade de alimentação, velocidade de deslocamento linear do bico.
- (iii) **Gap:** refere-se a distância entre filamentos adjacentes de uma mesma camada;
- (iv) **Ângulo de *raster*:** refere-se ao ângulo do padrão de preenchimento tipo ziguezague em relação ao eixo X de fabricação, visto na Figura 6 (c);
- (v) **Espessura do preenchimento (*raster*):** consiste na largura do filamento na estratégia de preenchimento, depende do diâmetro do bico extrusor;
- (vi) **Espessura do contorno:** refere-se à espessura do filamento no contorno das peças, depende do diâmetro do bico extrusor;

- (vii) Número de contornos: consiste no número de contornos para construir uma peça;
- (viii) *Gap* entre contornos: delimita qual a distância entre os filamentos que compõe o contorno, no caso de múltiplos destes;
- (ix) *Gap* entre perímetro e *raster*: refere-se a distância entre o contorno mais interno e a borda do preenchimento tipo *raster* de dentro da peça.

Figura 6: Descrição de parâmetros de processo da tecnologia FDM.



Fonte: Adaptado de Mohamed, Massod e Bhowmik (2015).

2.2 CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DAS PEÇAS IMPRESSAS

Nos últimos anos, houve uma evolução da resistência mecânica de polímeros e compósitos aplicados no processo de extrusão de material.

Conforme Landi e Andrade (2003), o ABS (acrilonitrila butadieno estireno) é formado por um componente elastomérico e dois componentes termoplásticos amorfos. Ele é um termoplástico rígido, possui uma leve flexibilidade quando comparada a outros termoplásticos rígidos, permitindo uma pequena deformação da peça, dependendo da sua geometria. Também é resistente a temperaturas mais

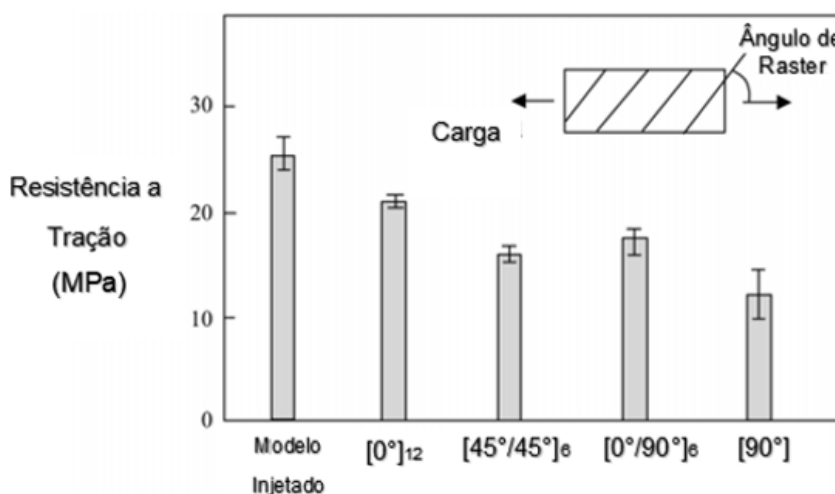
altas, comparado ao PLA, por exemplo. Ainda conforme o autor, em comparação ao PLA, o ABS apresenta características de engenharia, tendo como pontos a serem observados a durabilidade quando exposto a condições ambiente, dentre outros.

Dawoud, Taha e Ebeid (2016) observaram em seu estudo que a seleção adequada dos parâmetros do processo de AM por extrusão de material pode produzir peças de propriedades aceitáveis, sendo que o espaçamento entre o *raster*, em um *gap* negativo de $-0,05$ mm, torna o material mais denso, se aproximando da densidade de peças injetadas.

Ahn et al. (2002) realizaram um estudo experimental, avaliando o comportamento da resistência à tração de corpos de prova submetidos a ensaios em diferentes orientações, em comparação com peça em ABS injetado, de modo a validar o comportamento mecânico entre materiais similares obtidos por processos distintos. Para um *gap* de $-0,003$ polegadas ($-0,076$ mm), obtiveram os resultados mostrados na Figura 7.

Em Magalhães (2010) e Magalhães, Volpato e Luersen (2014) são realizados estudos que relacionam a influência de parâmetros construtivos no comportamento mecânico de peças fabricadas em ABS pelo processo de AM por extrusão de material. Os autores relacionaram a orientação da deposição de material em camadas com a teoria clássica da laminação (TCL), que é utilizada para descrever propriedades mecânicas conforme a orientação de fabricação de materiais compósitos laminados. Os trabalhos tiveram como objetivo demonstrar a anisotropia de peças impressas por AM, além de propor orientações de empilhamento de camadas no plano X-Y de modo a se obter melhores propriedades mecânicas. Entre outros pontos, concluiu-se que a deposição de camadas com defasagens diferentes de 90° em conjunto de configurações sanduíche fornecem ganhos consideráveis de resistência, se comparado a outras configurações, apesar da TCL não prever perfeitamente o comportamento dos componentes obtidos por AM.

Figura 7: Resistência à tração de corpos de prova de ABS em diferentes orientações.



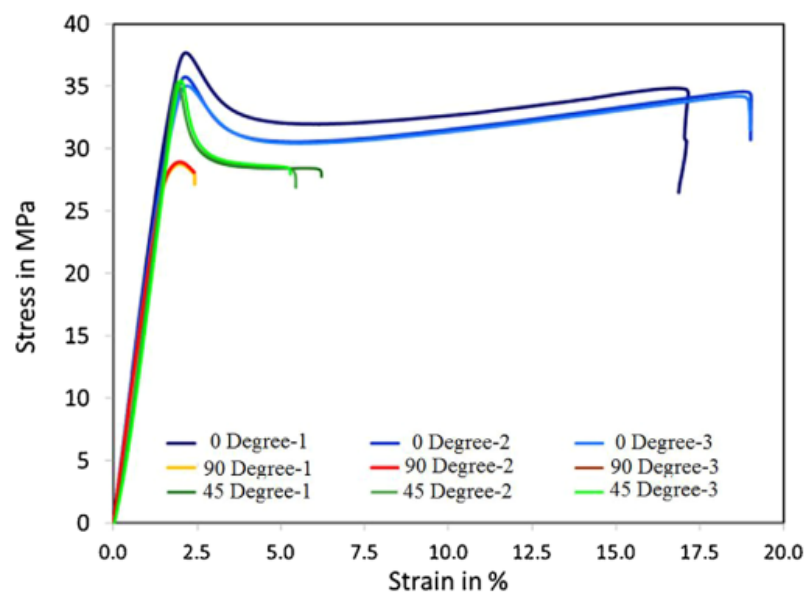
Fonte: Adaptado de Ahn et al. (2002).

O trabalho realizado por Klippstein et al. (2018) traz o resultado dos ensaios de tração (Figura 8) realizados em três corpos de prova concebidos em três orientações de preenchimento: 0°, 45° e 90°. Utilizando ABS, os autores analisam a fratura frágil em corpos de prova impressos com este material para a verificação de qual orientação apresenta a melhor resposta mecânica à tração.

Observa-se que a orientação de impressão 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 de deposição de material em camadas.

Para Volpato e Silva (2017 p.98-103), as propriedades mecânicas de uma peça fabricada por AM são diferentes de uma peça fabricada por meios tradicionais devido ao processo de fabricação. Na AM as peças são obtidas por meio da deposição do material em camadas, e em alguns casos existem direções preferenciais de processamento no plano XY. Dessa forma, o material possui anisotropia em suas propriedades mecânicas. A anisotropia é mais evidenciada no eixo de construção Z, onde ocorre a adesão entre camadas, como esquematizado na Figura 9.

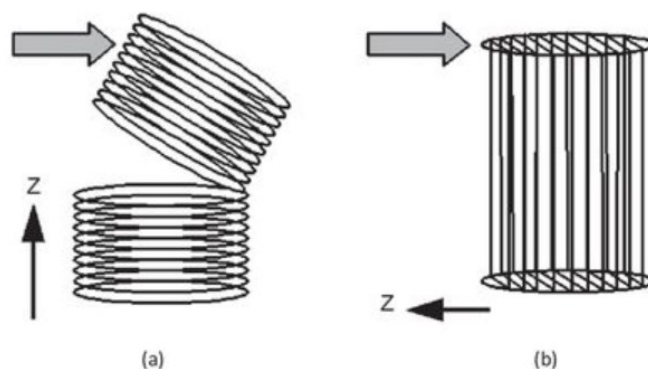
Figura 8: Diagrama Tensão – Deformação para componentes em FDM.



Fonte: Adaptado de Klippstein et al. (2018).

Ainda segundo os mesmos autores, a delaminação apontada na Figura 9 (a), ocorre devido à orientação de fabricação atribuída possuir uma menor resistência à flexão do que aquela da Figura 9 (b).

Figura 9: 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.



Fonte: Volpato e Silva (2017).

2.3 ESTRUTURAS CELULARES

Ramalho (2012) cita que materiais celulares são compostos por unidades celulares com arranjo bidimensional, ou tridimensional (espumas) formadas por filamentos ou faces interconectadas. São encontrados na natureza, 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 isolamento térmico e acústico e aumento de resistência à tração e flexão, com baixo peso.

Estruturas celulares são classificadas em duas categorias, sendo produzidas usando processos estocásticos (por exemplo, formação de espuma) e os concebidos utilizando processos determinísticos (por exemplo, materiais reticulares projetados). Deshpande, Fleck e Ashby (2001) citam que a resistência mecânica da espuma é cerca de três vezes menor que um material reticulado de mesma densidade volumétrica. A diferença na resistência é atribuída ao fato de que a espuma se deforma com a dobra da parede celular enquanto os elementos reticulares tracionam e comprimem de maneira mais definida.

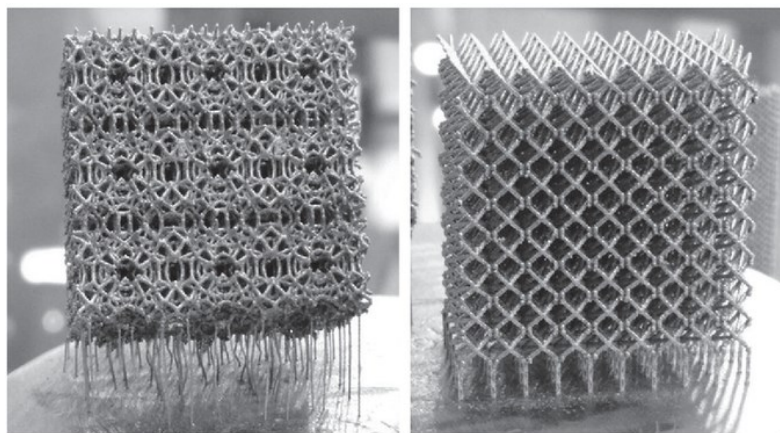
Para Gibson, Rosen e Stucker (2010), materiais celulares agregam na AM o conceito de depositar material somente quando for necessário para uma aplicação específica. No âmbito da engenharia, uma vantagem fundamental oferecida pelos materiais celulares é a alta resistência mecânica acompanhada de uma massa relativamente baixa. Um exemplo de material celular pode ser visto na Figura 10.

Volpato e Silva (2017 p.332) citam que a geometria complexa das estruturas celulares pode ser facilmente fabricada por AM. Conforme a tecnologia, deve se observar as facilidades e limitações quanto à necessidade de estruturas de suporte e a facilidade da remoção destas se necessário, sendo que os processos que utilizam pó como material de base possuem vantagens nesta situação.

Conforme Li e Wang (2017), estruturas celulares possuem propriedades acústicas satisfatórias em comparação com os seus homólogos convencionais, além de melhorar certas propriedades mecânicas tais como resistência à flexão, absorção ao impacto e módulo de cisalhamento, tornando-se ideais para uso em estruturas sanduíche. Esses autores realizaram o estudo entre três tipos de preenchimento celular, um preenchimento celular treliçado e duas variações de preenchimento *honeycomb*, com faces superiores fabricadas com polímero de fibra de carbono reforçado (CFRP), conforme pode ser visto na Figura 11, submetendo-as a ensaio de flexão de três pontos. Além disso, foi realizada uma análise por elementos finitos (*finite element analysis* - FEA). Os autores citam que os modelos numéricos computacionais mostram um resultado satisfatório em termos de padrão de

deformação, rigidez e resistência à flexão com os corpos de prova fabricados e submetidos ao ensaio, como pode ser visto na Figura 12.

Figura 10: Componente fabricado por manufatura aditiva com estrutura celular.

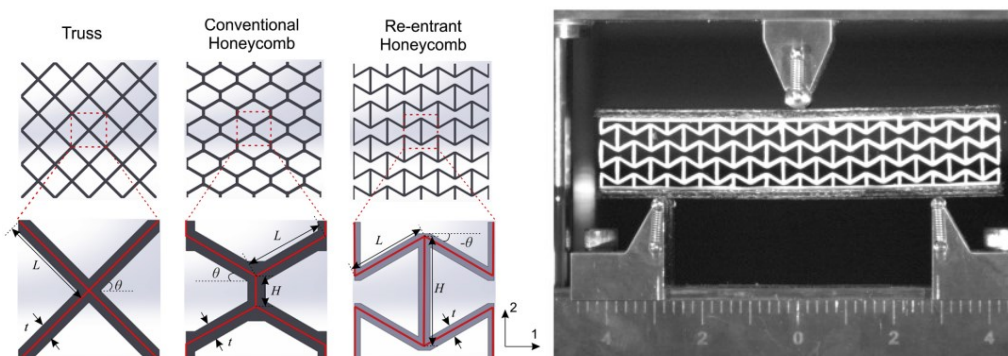


Fonte: Adaptado de Volpato e Silva (2017).

Os padrões de preenchimento utilizados na peça e resultados demonstrados na Figura 12 podem ser levados como exemplo para estimular o estudo da relação entre padrão de preenchimento e resistência à flexão. Além disso, a análise por elementos finitos se aproximou do resultado obtido em ensaios reais, mostrando a confiabilidade para aplicação em peças fabricadas por AM.

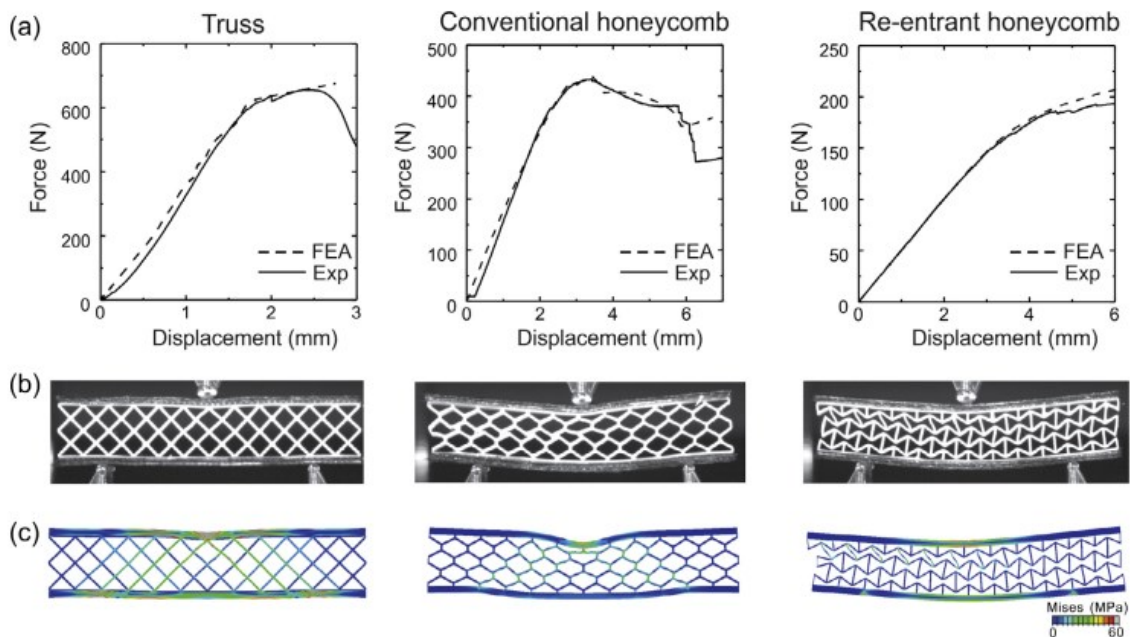
No plano X-Y é possível obter padrões de preenchimento celular pelo *software* de planejamento de processo, sem necessidade de modelagem no ambiente CAD, sendo os mais comuns, estruturas do tipo triangular, *honeycomb*, zigzague (também denominada de *raster*) e *tri-hexagon*.

Figura 11: Padrões de preenchimento e ensaio de flexão de três pontos.



Fonte: Adaptado de Li e Wang (2017).

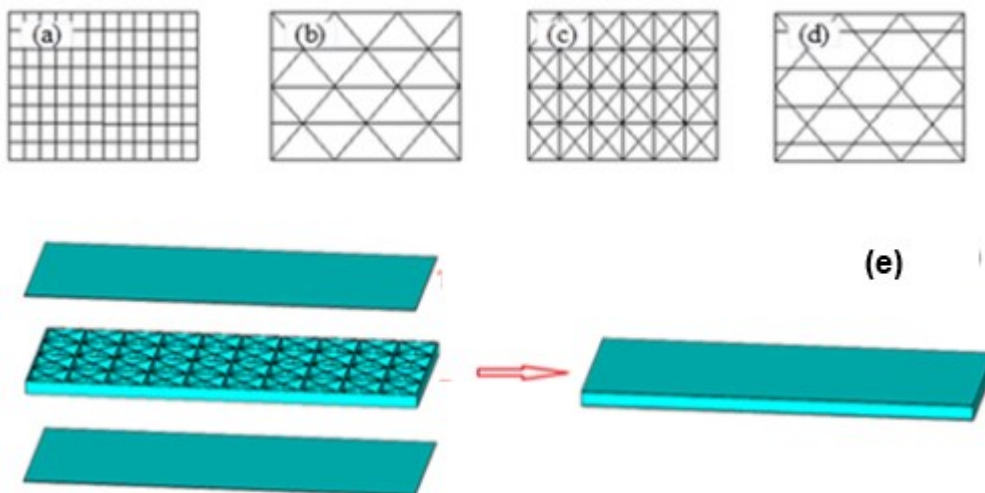
Figura 12: Comparação de métodos computacionais com o resultado experimental



Fonte: Adaptado de Li e Wang (2017).

Lu et al. (2018) realizaram um estudo que utiliza estruturas sanduíche, com o núcleo fabricado em AM no material PLA e as faces de um compósito epóxi de fibra de carbono. Os autores estudaram o comportamento em flexão de diferentes tipos de preenchimento celular no núcleo destas estruturas, conforme visto na Figura 13.

Figura 13: Estrutura sanduíche com variações do tipo de preenchimento celular (a, b, c e d).



Fonte: Adaptado de Lu et al. (2018).

Os autores utilizaram a carga em uma direção perpendicular ao empilhamento de camadas. A aproximação dos resultados obtidos pela análise por elementos finitos e o ensaio na máquina foram promissores. O estudo ainda mostra que com as mesmas restrições de massa e dimensões em todas as peças, os diferentes preenchimentos trazem resultados práticos distintos, sendo que o caso do padrão da Figura 13 (d) se destacou perante os demais.

2.4 OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Métodos de otimização são empregados em projetos de engenharia com o intuito de encontrar configurações que otimizam o desempenho segundo algum critério.

Arora (2004) define um problema de otimização como a busca por um ponto \mathbf{x} no espaço de projeto, que minimiza uma função objetivo $f(\mathbf{x})$ sujeita a p restrições, de igualdade $h_j(\mathbf{x}) = 0$ e m restrições, de desigualdade $g_i(\mathbf{x}) \leq 0$. Matematicamente pode-se escrever um problema de otimização como:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar:} \quad & f(\mathbf{x}) \\ \text{tal que:} \quad & h_j(\mathbf{x}) = 0, \quad (j = 1 \text{ a } p) \\ & g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad (i = 1 \text{ a } m). \end{aligned} \quad (2.1)$$

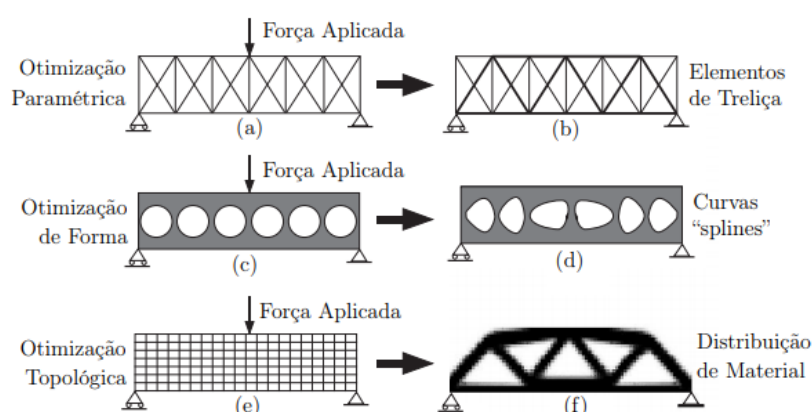
Segundo Kiyono (2008), existem três tipos de otimização estrutural: otimização paramétrica (Figura 14 (a) e Figura 14 (b)), otimização de forma (Figura 14 (c) e Figura 14 (d)) e Otimização Topológica (TO) (Figura 14 (e) e Figura 14 (f)). A otimização paramétrica não altera a forma da estrutura, e sim suas dimensões (parâmetros). A otimização de forma altera a forma de estrutura com o objetivo de otimizá-la utilizando o FEA para a análise das estruturas. A desvantagem da otimização de forma é que com a alteração de forma, a malha de elementos finitos é distorcida exigindo refazer a malha do domínio durante a otimização, o que em geral produz resultados pouco adequados e com alto custo computacional. A TO apresenta bom desempenho na redução de massa e aumento de rigidez se comparado aos outros métodos de otimização citados.

A TO consiste em uma ferramenta numérica que, de forma iterativa, melhora projetos estruturais para um determinado conjunto de requisitos de desempenho e limitações de projeto.

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.

Conforme Almeida e Bartolo (2010), definida a função objetivo, a ferramenta computacional tentará então otimizar a distribuição de material dentro de uma região limite (Figura 14 (e)), tendo no resultado da otimização da topologia um modelo reprojetoado (Figura 14 (f)).

Figura 14: Solução de um problema por diferentes abordagens de otimização.



Fonte: Adaptado de Kiyono (2008).

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 projetada.

Para Walton e Mozarzadeh (2017), o método SIMP (*Solid Isotropic Material With Penalization*) de TO consiste em um meio computacional que visa otimizar as estruturas de um projeto conceitual. Um modelo de elementos finitos é estabelecido sob um conjunto de condições de contorno (Figura 16 (a)). A otimização é executada a partir de uma função objetivo, e os elementos da malha são priorizados pela densidade relativa que indica importância (Figura 16 (b)) como função do módulo de elasticidade dado por:

$$E_h = \rho^p E_0 \quad (2.2)$$

onde E_h é o módulo de elasticidade calculado de um elemento otimizado, ρ é a densidade relativa do elemento e p é um fator de penalização, usado para discriminar entre vazios e sólido. E_0 o módulo de elasticidade do material de base. Os autores citam que a densidade relativa é dada por 0, que representa um vazio, e 1 representa um material sólido. Elementos de baixa densidade são filtrados e a topologia ideal é demonstrada (Figura 16 (c)). O resultado é um componente com forma não completamente definida que convergiu para um estado de homogeneidade em relação às suas tensões internas. Na parte final, o modelo de elementos finitos é exportado para o CAD para tratar a geometria do componente (Figura 16 (d)).

A liberdade construtiva com relação à obtenção de geometrias orgânicas e complexas por AM, tornam a TO uma ferramenta tecnológica altamente promissora e viável em componentes de alto desempenho.

Rezaie et al. (2013) realizaram um estudo onde foi aplicada a TO juntamente com a AM utilizando o método SIMP. Utilizaram para a impressão dos corpos de prova uma impressora de baixo custo. Considerando o material isotrópico para o estudo de TO, a função objetivo foi a redução de massa em 50%. Os autores concluem que a utilização da TO aumenta significativamente o valor da energia de deformação no componente projetado, como pode ser visto na Figura 15.

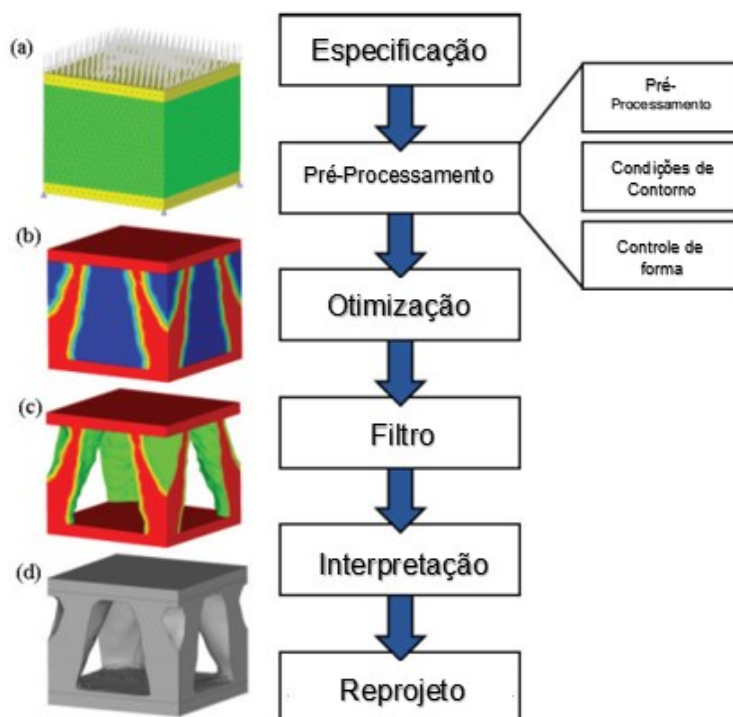
Figura 15: TO e seus resultados.



DESCRIÇÃO DO PROJETO	VOLUME RESTANTE (%)	ENERGIA DE DEFORMAÇÃO N.mm
MODELO INICIAL	100	69.4
MODELO OTIMIZADO POR TO	50	98.02

Fonte: Adaptado de Rezaie et al. (2013).

Figura 16: Etapas de um problema de otimização topológica.

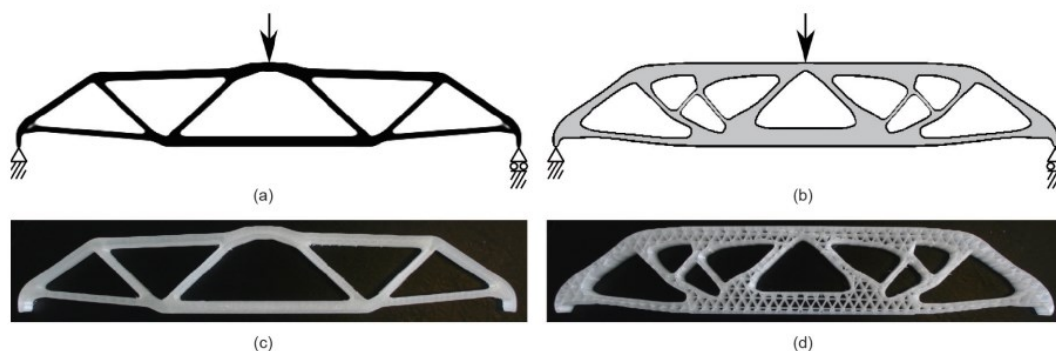


Fonte: Adaptado de Walton e Moztarzadeh (2017).

Clausen, Aage e Sigmund (2016) utilizaram para executar a TO valores para o coeficiente de Poisson e módulo de elasticidade seguindo a hipótese de um material elástico linear, assumindo o material homogêneo e isotrópico. O material utilizado no estudo é um copolímero em bloco de Estireno-Butadieno-Estireno, que consiste em um termoplástico elastômero com alongamento de 500%, como esse o corpo de prova não se rompe no ensaio, é possível visualizar o comportamento de flambagem da estrutura.

Os mesmos autores realizaram a comparação entre a TO de uma estrutura 100% preenchida (Figura 17 (a) e 17 (c)) com uma estrutura otimizada com maiores dimensões, preenchida por uma estrutura celular triangular (Figura 17 (b) e 17 (d)), de modo a ter uma massa equivalente entre os dois modelos. O objetivo do estudo foi comparar o comportamento do componente em flambagem, entre uma estrutura otimizada sólida e uma estrutura otimizada com preenchimento triangular.

Figura 17: Estudo de otimização topológica com variação no preenchimento.



Fonte: Clausen, Aage e Sigmund (2016).

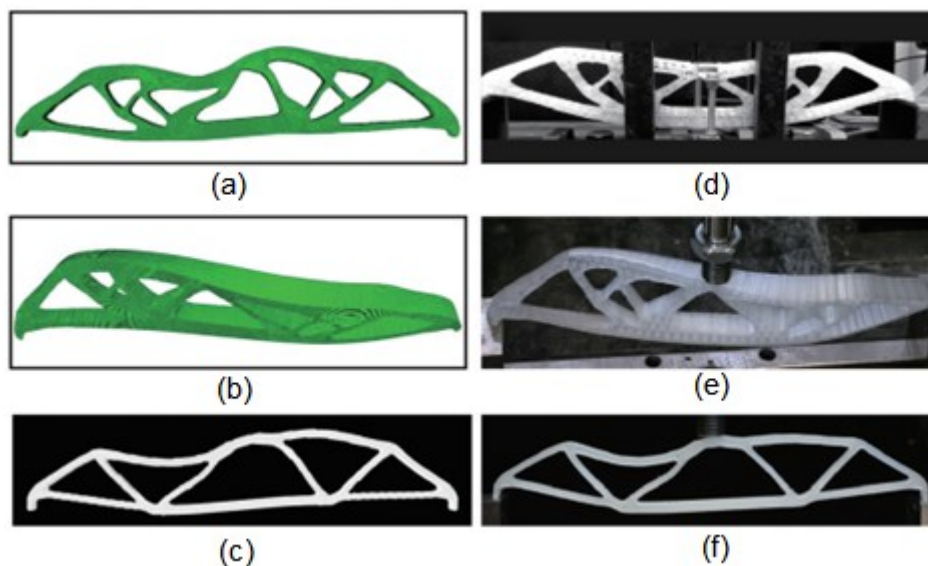
Ainda conforme os autores, a suposição de que o material impresso é elástico linear é uma idealização grosseira, ignorando pelo menos três efeitos: viscoelasticidade, dependência do módulo de elasticidade e anisotropia devido à impressão em diferentes orientações. Porém, são características de difícil previsibilidade em estruturas complexas. No entanto, as tendências dos resultados são satisfatórias, e os desvios são pequenos em comparação com as diferenças de desempenho prático nos ensaios realizados, conforme pode ser visto na Figura 18.

Verificou-se que as estruturas celulares proporcionaram um aumento na resistência de flambagem do ensaio na ordem de 20-25% em relação às estruturas maciças, tendo um potencial exploratório neste sentido em trabalhos futuros.

Na Figura 18 (d), os autores utilizaram um dispositivo de modo a manter a estrutura fixa no plano Y-Z, sem permitir deformações em X. O que chama a atenção é que o resultado na simulação computacional (Figura 18 (a, b e c)) são muito próximos do resultado real obtido no ensaio de flexão. Sendo assim, é reforçado o argumento que a simulação computacional por elementos finitos pode ser aplicado à AM.

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, onde 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.

Figura 18: Comparação de métodos computacionais com (a) TO e estrutura triangular com densidade de preenchimento de 20% em ambiente computacional e (d) ensaio de flexão; (b) TO e estrutura com preenchimento triangular com densidade de preenchimento 20% em ambiente computacional e (e) ensaio de flexão; (c) TO e estrutura com preenchimento triangular com densidade de preenchimento 100% em ambiente computacional e (f) ensaio de flexão.



Fonte: Clausen, Aage e Sigmund (2016).

Radtke e Trabasso (2009) citam a importância do estudo pelo método dos elementos finitos do comportamento mecânico de componentes obtidos por processos de AM. Conforme a característica do processo, o material, temperatura e demais variáveis podem influenciar na aplicabilidade do componente. Utiliza-se então o FEA para viabilizar plenamente a aplicação de protótipos como “componente fim” em determinados projetos.

2.5 OPORTUNIDADE DE PESQUISA

Com base na revisão bibliográfica, percebeu-se a importância da AM e as possibilidades de aplicação e melhorias de peças fabricadas por AM por extrusão de material como visto na Seção 2.1.

A TO aplicada a AM por extrusão de material é abordada por outros autores, porém um estudo que tenha a abrangência de identificar as propriedades do material a ser utilizado, desenvolvimento de uma peça para uma aplicação específica, e análise do comportamento mecânico dessa peça, ainda não foi plenamente explorado.

A utilização de uma impressora de extrusão de material de baixo custo e estudos comparativos (experimentais e numéricos) entre a resistência a flexão de diferentes tipos de preenchimento em uma peça, e a geometria obtida por TO aplicada a essa peça, também são diferenciais importantes e complementares aos trabalhos já realizados.

O conhecimento das características mecânicas do material base é relevante e, baseado na Seção 2.2, vê-se a oportunidade de levantamento das propriedades mecânicas do ABS.

Visando o uso fim de peças fabricadas por AM, a TO e a utilização de estruturas celulares possuem um papel relevante a ser explorado, por reduzirem a massa e, conseqüentemente, o tempo de fabricação. Obter resultados quanto ao comportamento mecânico dessas estruturas também é um ponto importante.

A aplicação de TO e o estudo dos diferentes tipos de preenchimento é uma oportunidade para a utilização da AM com material ABS para uso fim em aplicações reais de alto desempenho. Além disso, a oportunidade do estudo da combinação da TO com estruturas de preenchimento em peças fabricadas por extrusão de material, e a resultante dessa combinação para a obtenção de uma peça ainda mais leve, não foi explorada da maneira proposta no presente estudo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos para elaboração dos experimentos e análises. Para melhor entendimento, este é subdividido na sequência de etapas para obtenção dos resultados. De posse do material ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), para a fabricação dos corpos de prova e das peças, a impressora 3D foi inicialmente calibrada para se manter o mesmo padrão de fabricação para todos os casos. Após a fabricação dos corpos de prova, em diferentes orientações de deposição de raster no plano X-Y, os mesmos foram submetidos a ensaio de tração, por ser este um meio convencional e normatizado para a obtenção de propriedades mecânicas de materiais. As propriedades obtidas, tais como limite de resistência a tração, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e tensão de escoamento, foram utilizadas no procedimento de TO. Foram então fabricadas as peças com diferentes preenchimentos celulares e as que seriam submetidas a TO para realização do ensaio de flexão de três pontos. Posteriormente, foi realizado a FEA (análise por elementos finitos) para validação dos resultados no ambiente computacional.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

As peças analisadas no presente trabalho foram fabricadas utilizando-se dois rolos de ABS Premium de 500 g cada na cor branca, fornecidos pela empresa 3D Prime. Cada rolo equivale a aproximadamente 200 m de comprimento e vem armazenado com sílica gel para evitar excesso de umidade, como visto na Figura 19 (a). O filamento possui diâmetro 1,75 mm, compatível com a impressora de extrusão de material utilizada, com variação de +/- 0,02 mm, segundo informações do fabricante.

Não há informação técnica de resistência mecânica fornecida pelo fabricante do material escolhido. A Tabela 1, a título de exemplo, mostra as propriedades de ABS de dois fabricantes diferentes, onde se observa a grande diferença nas mesmas. Na fabricação dos corpos de prova foi utilizada a impressora 3D Anycubic I3 Mega mostrada na Figura 20. Baseada na tecnologia de extrusão de material, possui um bico extrusor, com diâmetro de 0,4mm, mesa aquecida (capacidade até 120°C) e capacidade de impressão de alturas de camada de 0,1mm até 0,4mm.

Figura 19: Rolo do material utilizado para impressão (ABS)



Fonte: Autoria própria

Para verificações de medidas das peças fabricadas, foi utilizado um paquímetro com relógio, marca Mitutoyo, com capacidade de medição de 150 mm e resolução de 0,05 mm.

Outro material utilizado foi o adesivo plástico para PVC incolor da marca Tigre. O adesivo tem por objetivo melhorar a aderência da peça à mesa aquecida, de modo a evitar descolamento da peça e, conseqüentemente, distorções na forma e dimensões dos corpos de prova.

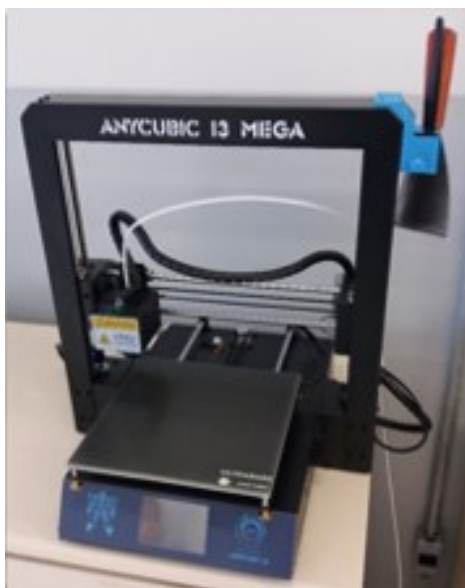
Tabela 1 - Propriedades do ABS obtidas dos fabricantes.

Propriedades	ABS Plus 3D Lab	ABS Plus Stratasys
Módulo de elasticidade	1335,9 MPa	2200 MPa
Tensão de ruptura	29 MPa	33 MPa
Alongamento	7,8%	6%
Limite de escoamento	14,7 MPa	31 Mpa

Fonte: Stratasys (2018).

Para os projetos em *software* CAD, TO, análise computacional, anotações, compilação dados, tabelas, planilhas e gráficos, foi utilizado um notebook Samsung X40 com processador Intel® Core™ i7-5500U Dual Core 2.4 GHz, 8 GB DDR3L 1600 MHz, com placa de vídeo integrada NVIDIA GeForce 920M até 2 GB de memória dedicada.

Figura 20: Impressora 3D Anycubic i3 Mega.



Fonte: Autoria própria.

Os ensaios mecânicos foram realizados em parceria com o SENAI/CIC, localizado na Rua Senador Accioly Filho, 298, bairro Cidade Industrial em Curitiba - PR. Os ensaios foram realizados em ambiente com temperatura controlada em 23°C no laboratório de materiais da unidade do SENAI/CIC. A máquina utilizada para os ensaios de tração e flexão foi uma EMIC DL 23-100 (Figura 21), um extensômetro digital e dispositivo para ensaio de flexão de três pontos.

Figura 21: Máquina EMIC DL 23-100.



Fonte: Autoria própria.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Procedimento de calibração da impressora

O *software* utilizado para configurações de parâmetros de processo foi o Cura versão 3.5.1. Trata-se de um *software* aberto com grande quantidade de recursos de fatiamento e planejamento de processo, tornando-se adequado a proposta do presente estudo.

Para aumentar a repetitividade da fabricação dos corpos de prova e a correção de possíveis desvios dimensionais da máquina foi realizado o procedimento de calibração da impressora.

Para maior adesão lateral entre filamentos adjacentes plano X-Y, a utilização de valores de *gap* negativo é recomendado. Este ajuste gera maior adesão entre filamentos de uma mesma camada além de favorecer a melhora da precisão dimensional, conforme visto no Capítulo 2, ítem 2.2 citado por Ahn et al. (2002).

Foram fabricados cinco corpos de prova para calibração dimensional, com dimensões nominais 20 mm x 20 mm x 10 mm e preenchimento de 100%. As medidas foram verificadas por paquímetro de relógio, obtendo-se dimensões conforme a Tabela 2. A Figura 22 apresenta os corpos de prova de calibração dimensional.

Tabela 2 - Dimensões dos corpos de prova para calibração da impressora.

Peça de Calibração	x (mm)	y (mm)	z (mm)
1	20,10	20,10	10,15
2	19,80	20,00	9,90
3	20,00	19,90	10,05
4	19,95	20,05	10,05
5	20,05	19,95	10,05

Fonte: Autoria Própria.

O corpo de prova 1 foi fabricado pelos parâmetros padrão do *software* Cura. Observados os desvios dimensionais com relação ao projetado, foi compensado no *software* a diferença observada, lançando *horizontal expansion*, este valor com sinal negativo, o que se trata de um fator de escala. Os demais corpos de prova

passaram pelo mesmo procedimento, até atingir o resultado mais próximo das dimensões de projeto, aproximados de uma maneira satisfatória nos corpos de prova 3 e 4 com uma compensação de dimensionamento de $-0,07\text{mm}$ nos eixos X e Y.

A taxa de alimentação consiste nos passos/mm que o motor do extrusor da impressora deposita material no *raster*, em função do diâmetro do filamento e do diâmetro de saída do bico. Foi utilizada uma taxa de alimentação de 110%, ou seja, a alimentação de material 10% maior que o *default* para a máquina. Isso foi estabelecido durante os ajustes da impressora para que durante a deposição de material no *raster*, os filamentos tenham uma maior adjacência de modo a reduzir o *gap*. O valor do *gap* no *software* cura, não pode ser mensurado, porém a adjacência entre filamentos pode ser aumentada pelo parâmetro da taxa de alimentação.

Figura 22: Corpos de prova para ajuste dimensional e de fluidez



Fonte: Autoria própria.

A calibração do eixo z foi realizada através do nivelamento da mesa com relação à altura do bico extrusor por meio do ajuste manual dos parafusos correspondentes, nivelando o bico em relação à mesa, com a distância de uma folha de papel A4. Em particular, a impressora utilizada apresenta quatro parafusos para nivelamento da mesa, conforme pode ser visto na Figura 23.

Figura 23: Sistema de nivelamento da mesa.



Fonte: Autoria própria.

Após a calibração das características dimensionais do equipamento, foi verificada experimentalmente a temperatura ideal de impressão com o auxílio da recomendação do fabricante e impressão de corpos de prova para validação.

Para os demais parâmetros, foram utilizados os recomendados para o material ABS, pelo fabricante do material, sendo esses detalhados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros para impressão dos corpos de prova adotados pelo autor.

Parâmetro	Valor
Altura de camada	0,2 mm
Espessura do <i>raster</i>	0,4 mm
Espessura do contorno	0,4 mm
Quantidade de contornos	1
Percentual de preenchimento	100%
Temperatura de impressão	220°C
Temperatura da mesa	110°C
Velocidade de retração	55 mm/s
Distância de retração	5 mm
Velocidade de contorno	40 mm/s
Velocidade de impressão do <i>raster</i>	40 mm/s
Velocidade de impressão da camada inicial e final	20 mm/s
<i>Brim</i>	8 mm
<i>Horizontal expansion</i> (fator de escala)	-0,07 mm
<i>Flow</i> (taxa de alimentação)	110%
Temperatura de envelopamento	N/A

Fonte: Autoria própria.

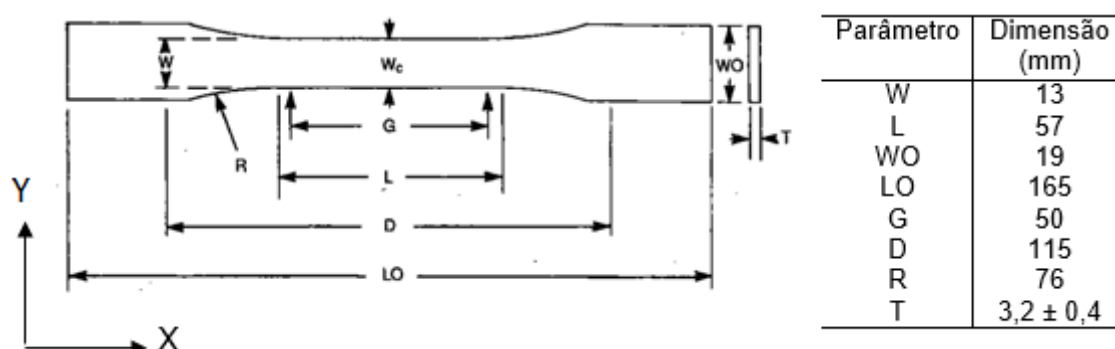
3.2.2 Procedimento para os ensaios de tração uniaxial

Após os ajustes dos *setups* de máquina, os corpos de prova foram desenhados utilizando o *software* Solidworks, com dimensões especificadas conforme norma ASTM D-638 tipo I, conforme Figura 24.

As propriedades mecânicas necessárias para a TO, foram determinadas pela média de valores obtidas por ensaio de tração padronizado para polímeros

conforme norma ASTM D-638. Os corpos de prova foram fabricados em orientações de preenchimento tipo *raster* de 0° , 45° e 90° em todas as camadas (Figura 25), com parâmetros de fabricação idênticos. Isso permitiu obter as propriedades relacionadas ao módulo de elasticidade do material (E) nas direções 1 e 2, coeficiente de Poisson, tensão de ruptura conforme orientação e módulo de cisalhamento (G). Foram fabricados quatro corpos de prova em cada uma das orientações de preenchimento (0° , 45° , 90°), no plano X-Y, totalizando 12 corpos de prova.

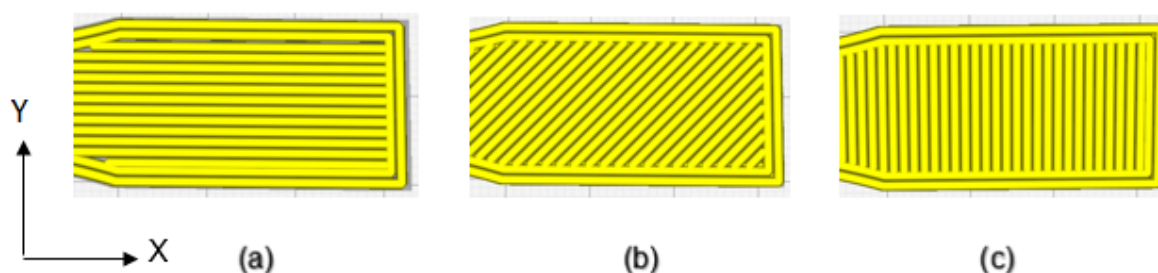
Figura 24: Dimensões do corpo de prova segundo a norma ASTM D-638.



Fonte: Adaptado de norma ASTM D-638.

Os corpos de prova fabricados foram identificados conforme o ângulo de *raster* (Figura 26), sendo descritos como X.1, corpos de prova impressos a 0° , X.2 corpos de prova impressos a 45° e X.3 corpos de prova impressos a 90° , sendo "X" o número do corpo de prova, variando de 1 a 4. Foram depositadas 15 camadas de 0,2 mm, todas com a mesma orientação de preenchimento, conforme o corpo de prova.

Figura 25: Representação esquemática do ângulo de *raster* obtido no *software* Cura, para as orientações: (a) 0° , (b) 45° , c (90°).



Fonte: Autoria própria.

Um extensômetro foi utilizado para a medição da deformação do material durante o ensaio de tração. Os corpos de prova foram fixados na vertical em suas extremidades, conforme visto na Figura 26.

Inicialmente, cinco corpos de prova de sacrifício (sem fins de obtenção de resultados) foram ensaiados para análise de comportamento do material, onde notou-se uma fratura frágil e comportamento semelhante. Este teste demonstrou a necessidade de aplicação de extensômetro digital e possíveis regulagens de fim de curso do equipamento.

Figura 26: Procedimento do ensaio de tração.



Fonte: Autoria própria.

O material foi submetido a uma pré-carga de 14 kgf e velocidade de ensaio de 100 mm/min e os ensaios de tração foram realizados até a ruptura do material. A partir destes ensaios de tração, foram obtidos valores das seguintes propriedades mecânicas e que serão utilizadas como parâmetros na TO: , módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, tensão de escoamento, para parametrizar o *software* de otimização topológica.

Os corpos de prova para realização de ensaio foram mantidos a temperatura de 36 graus em uma estufa utilizada para acondicionar materiais em ensaios metalográficos. Somente a temperatura desse ambiente é controlada.

Os resultados obtidos nos ensaios são apresentados e discutidos no Capítulo 4. O módulo de elasticidade foi obtido através da inclinação da linha de tendência tensão *versus* deformação média entre os três ensaios (detalhes são apresentados no Capítulo 4, Figura 51). O coeficiente de Poisson foi obtido a partir

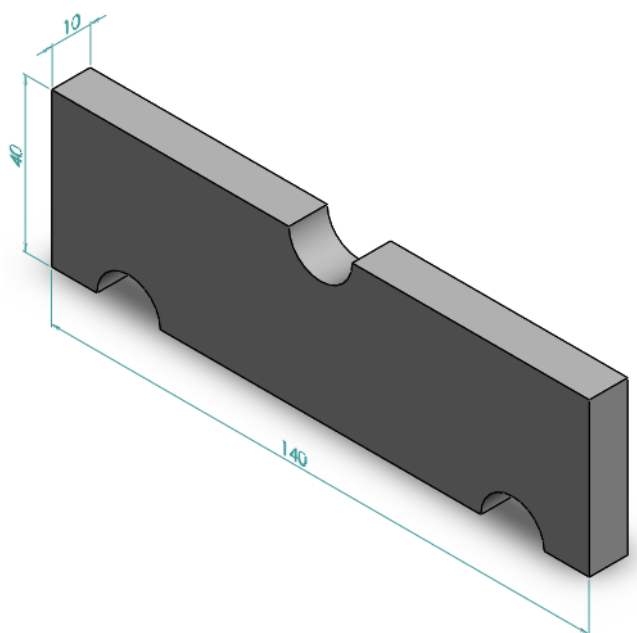
da relação entre a deformação do corpo de prova na deposição raster em 0° e a deformação na deposição de raster em 90° .

3.2.3 Procedimento de otimização topológica

A TO foi realizada utilizando as propriedades obtidas mediante as propriedades dos corpos de prova impressos em ABS via ensaios de tração

Para tanto, inicialmente, um componente com formato apresentado na Figura 27 foi projetado de modo que possa ser adaptado à máquina para realização do ensaio de flexão de três pontos, ou seja, com as medidas do cutelo e dos apoios da máquina utilizada no teste. O projeto teve como objetivo o “encaixe” da peça com o equipamento de modo que simulasse as restrições consideradas no processo de TO.

Figura 27: Modelo geométrico do corpo de prova a ser otimizado (dimensões em mm).



Fonte: Autoria própria.

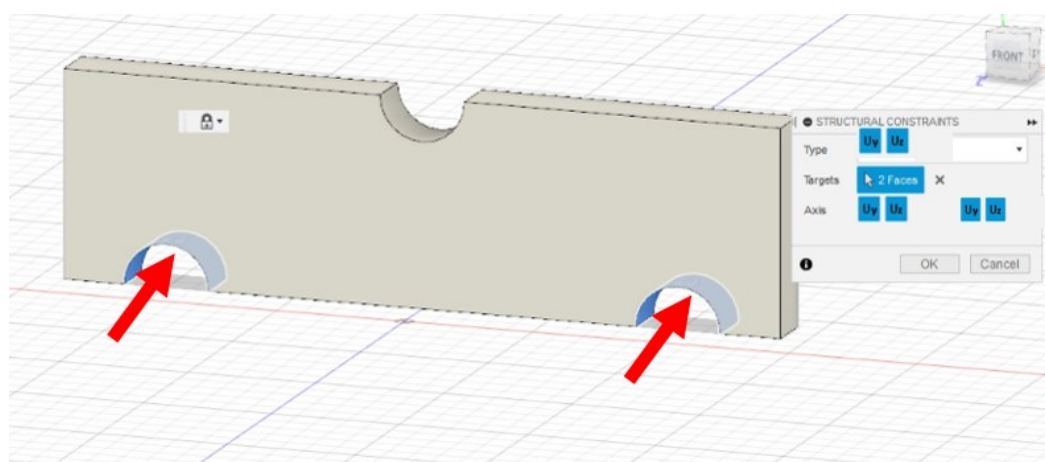
As técnicas de otimização aqui utilizadas visaram verificar a resposta em flexão das peças estudadas com relação a uma redução de massa de 50% do projeto inicial. Para encontrar a geometria ótima por TO do corpo de prova sujeito à flexão, foi utilizado o *software* Fusion 360, da empresa Autodesk. Para tanto, foram propostas três abordagens: uma utilizando a TO realizada no Fusion 360, outra

através da redução de percentual de preenchimento com o uso de estruturas celulares no *software* Cura e uma terceira combinando TO e estrutura celular.

Os parâmetros para a TO são descritos na sequência.

Primeiramente, foram definidos os tipos de apoio para o corpo de prova. Conforme a Figura 28, as superfícies indicadas foram consideradas como apoios fixos com relação a Y e Z. Esta suposição foi realizada devido ao tipo de apoio que a peça estaria sujeita no equipamento em que foi feito o ensaio de flexão.

Figura 28: Definição dos apoios para realizar a otimização topológica no *software* Fusion 360.

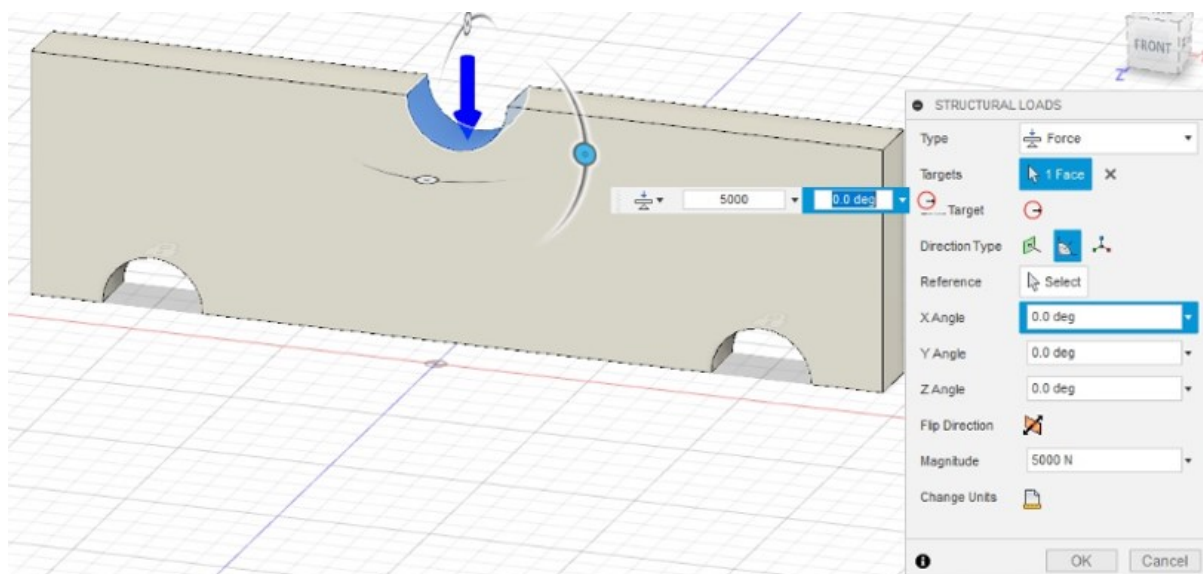


Fonte: Autoria própria.

Foi então simulada a aplicação de uma carga de 5 kN na parte superior da peça, de modo a representar a força do cutelo durante o ensaio de flexão, como mostrado na Figura 29.

Atribuiu-se então a peça as propriedades do material ABS. Os valores das propriedades dos materiais que foram obtidos em ensaio de tração uniaxial com corpos de prova em ABS, com procedimento descrito na seção 4.2.2, seus resultados estão apresentados na Tabela 4.

Figura 29: Aplicação de força para realizar a otimização topológica no Fusion 360.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Propriedades do material ABS utilizadas no sistema CAD, obtidos experimentalmente pelo ensaio de tração uniaxial (Valores Médios).

Propriedade	Valor	Desvio Padrão
Módulo de elasticidade Médio das orientações (0°, 45° e 90°)	2,32 GPa	± 0,18 GPa
Coefficiente de Poisson	0,54	
Módulo de cisalhamento	753,24 MPa	
Resistência à tração	26,62 MPa	± 3,34 MPa
Limite de escoamento	13,31 MPa	± 3,34 MPa

Fonte: Autoria própria.

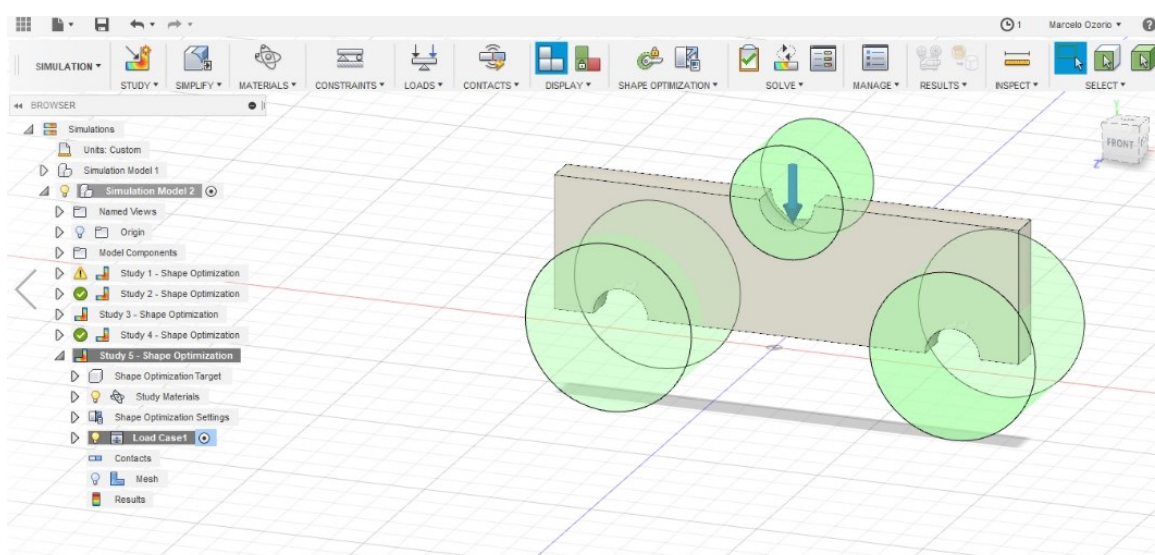
A Tabela 4 possui os valores médios dos resultados que serão apresentados na Tabela 7 do Capítulo 5, ítem 5.1 do presente trabalho. Para a obtenção dos valores das propriedades mecânicas, o material foi considerado isotrópico.

De modo a manter um reforço para os apoios e para o cutelo, preservando assim a integridade dessas regiões durante a realização do ensaio de flexão, definiu-se uma área de preservação de geometria antes do processo de otimização.

A demonstração da região a ser preservada pode ser vista na Figura 30 e identificada pela região verde. Isso foi definido pois, para o processo de otimização, o *software* não prevê manter a estabilidade do conjunto, eliminando parte do apoio do corpo de prova. Assim, foi atribuído um diâmetro de 20 mm a ser preservado nas regiões de apoio e de aplicação da força. A obtenção desse valor foi arbitrário, já que o *software* não interpreta essa situação automaticamente.

A geração da malha de elementos finitos no *software* é automática, segundo os critérios pré-estabelecidos pelo usuário. Os elementos são do tipo sólidos com interpolação quadrática (parabólicos).

Figura 30: Determinação da região a ser preservada durante a TO.



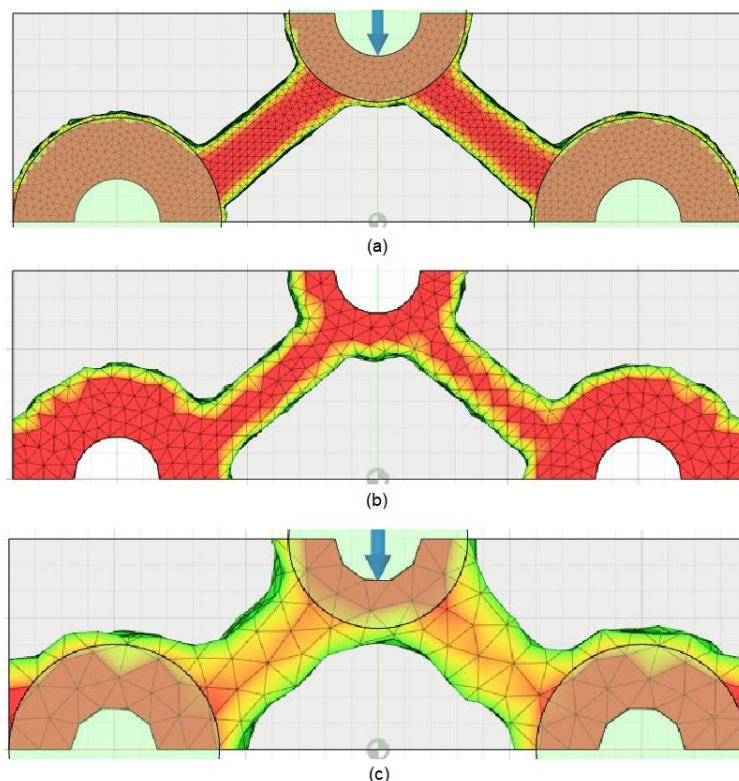
Fonte: Autoria própria

Foram utilizados parâmetros para refinamento da malha visando um resultado que exigisse menor retrabalho durante o pós processamento do modelo otimizado. Além disso, uma malha mais refinada traz melhores resultados no cálculo de otimização, mas tem como ônus o aumento do tempo de simulação.

A geração da malha foi limitada a uma razão de aspecto máximo igual a 7 (sete). A razão de aspecto é definida como a relação entre as dimensões laterais dos elementos de malha. Para a geração da malha, o tamanho mínimo dos elementos é 20% do tamanho médio. Para a adaptabilidade da malha é utilizada a tensão de Von Misses. Esses parâmetros foram escolhidos pois obtiveram uma resposta computacional mais rápida e com um resultado de geometria melhor do que uma malha mais grosseira.

A Figura 31 (a) mostra a utilização de uma malha mais refinada, com os parâmetros anteriormente descritos, a Figura 31 (b) mostra uma malha com tamanho mínimo de 30% do tamanho médio e uma razão de aspecto 9, e a Figura 31 (c) mostra uma malha maior, com tamanho mínimo de 50% do tamanho médio e razão de aspecto 12. A Figura 32 apresenta a peça com a malha utilizada para o estudo.

Figura 31: Malha utilizada para a TO: (a) Malha utilizada, (b) malha intermediária, (c) malha grosseira.



Fonte: Autoria própria.

As propriedades da malha para os diferentes modelos apresentados na Figura 31, podem ser vistos na Tabela 5.

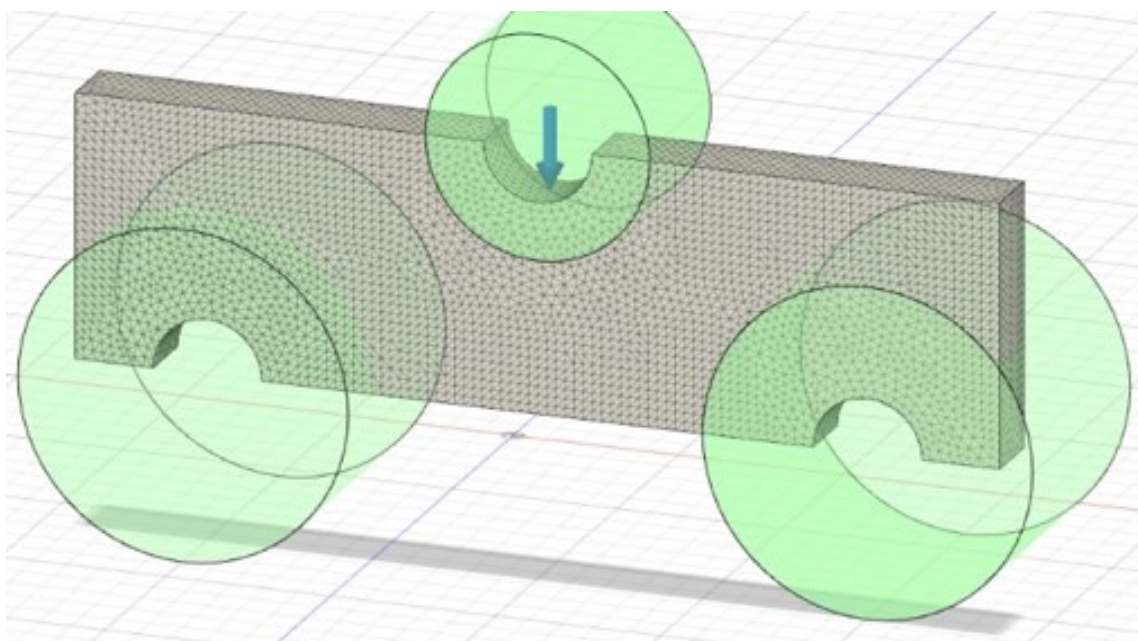
Tabela 5 - Propriedades de malha.

Propriedades	Malha utilizada	Malha intermediária	Malha grosseira
Razão de aspecto	7	9	12
Tamanho mínimo dos elementos	20%	30%	50%
Número de elementos	122844	59593	2123
Número de nós	178597	88692	620

Fonte: Autoria própria.

A Figura 33, demonstra os objetivos globais para redução de massa e maximizar a rigidez na peça. Na primeira linha da referida figura, define-se a redução de massa, que neste caso é menor ou igual a 50%, na segunda linha define-se a maximização de rigidez para os parâmetros que foram estabelecidos e apresentados anteriormente, preservando as regiões delimitadas para os apoios e aplicação de força.

Figura 32: Malha inicial para a TO no Fusion 360.



Fonte: Autoria própria.

O Fusion 360 não possui um módulo específico de TO para peças obtidas por AM, sendo assim, o resultado da análise não leva em conta a anisotropia do material, ou seja, o material é considerado isotrópico.

Com os parâmetros definidos, o Fusion 360 realiza o cálculo por meio do seu servidor na nuvem, e retorna o resultado da peça otimizada conforme os critérios estabelecidos. O resultado obtido após a solução com os parâmetros aqui descritos pode ser visto na Figura 34.

Figura 33: Definição dos critérios para otimização topológica no Fusion 360.

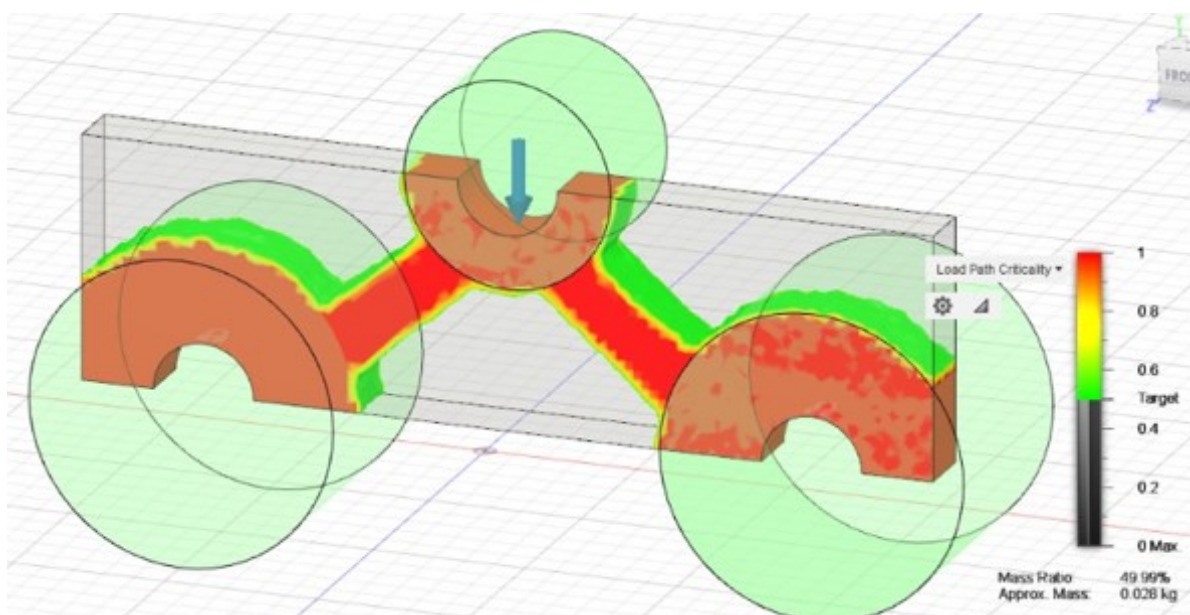
	Parameter	Expression	Value	Units
Global Objectives +	Target Mass	< OR =	50	%
	Stiffness	Maximize		
Global Constraints +				

Preserve Entities with Loads and Constraints

Fonte: Autoria própria.

Com o resultado da otimização topológica, a geometria foi tratada para posterior fabricação na impressora 3D. A geometria obtida é orgânica e segue os parâmetros de malha estabelecidos, quanto mais refinada a malha, mais “suave” é a geometria obtida. Como visto na Seção 2.4, após a interpretação dos resultados é necessário um “reprojeto” da geometria.

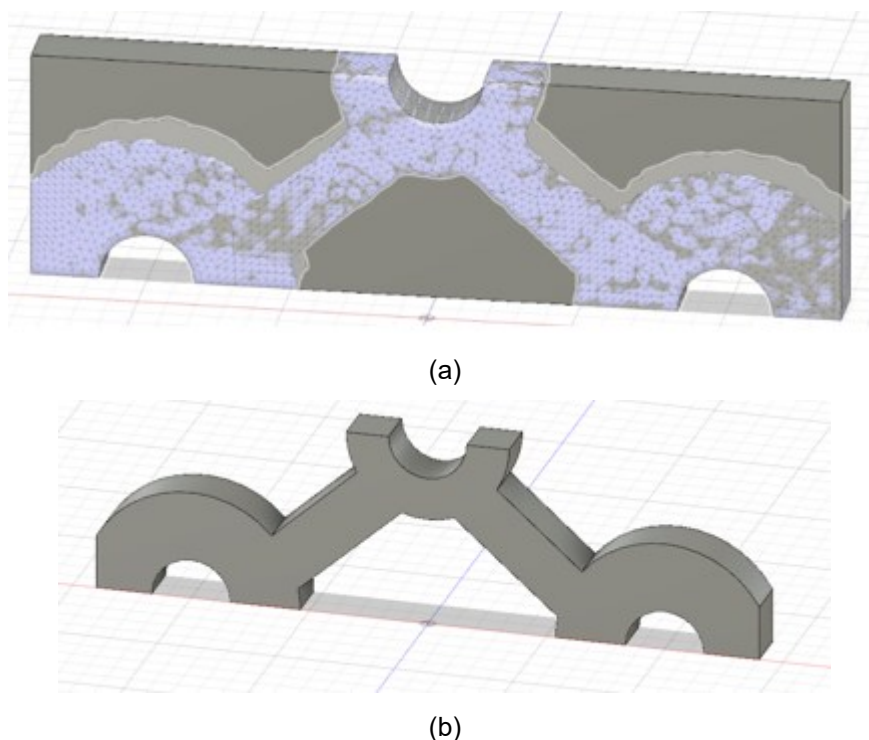
Figura 34: Resultado final da otimização topológica.



Fonte: Autoria própria.

A Figura 35 (a), está um modo de visualização no Fusion 360, onde a geometria obtida por TO é demonstrada inscrita na peça que foi otimizada, e na Figura 35 (b), está a geometria da TO tratada no seu formato final a ser fabricada pelo processo de extrusão de material.

Figura 35: (a) Resultado obtido da TO e (b) geometria tratada após o processo de TO.



Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Impressão dos corpos de prova (peças) otimizados

Para impressão dos corpos de prova foram utilizados os parâmetros obtidos durante a calibração da impressora, como apresentado na Subseção 3.2.1 na Tabela 3. Os corpos de prova foram impressos durante cinco dias consecutivos.

A impressão dos corpos de prova sujeitos à redução de massa (peças) foi realizada também com auxílio do *software* Cura. Os corpos de prova submetidos a TO foram impressos com 100% de preenchimento com ângulo de *raster* de 45° e o ângulo de *raster* entre camadas de 90°. Na Figura 36 (a) é possível ver, de forma esquemática, duas camadas em sequência, a camada anterior em cinza, e a posterior em amarelo. Essa sequência de fabricação se alternou durante a deposição das camadas da peça. A utilização desses parâmetros de fabricação tem

por objetivo a aproximação da condição simulada para TO em *software*. O programa de simulação considera o material homogêneo e isotrópico. Para diminuir o efeito da anisotropia, a utilização da orientação do *raster* a 90° entre as camadas tende a não acentuar a anisotropia em uma direção durante o ensaio, devido ao cruzamento dos filamentos e o *gap* negativo tende a deixar o material mais homogêneo, como visto na seção 2.2. Além disso, a direção da distribuição de tensões no corpo de prova, tem orientação próxima com a orientação do *raster* a 45° na peça e isso auxilia na redução da anisotropia para este caso. Em outra geometria, a evidência da anisotropia poderia ser maior do que no presente caso.

O tempo de fabricação dos corpos de prova foi obtido pelo resultado demonstrado ao final da impressão pela impressora 3D, desconsiderando o tempo para aquecimento da mesa em todos os casos. Serão apresentados no ítem 4.3 do capítulo 4 estes valores. O corpo de prova pode ser visto na Figura 36 (b).

Figura 36: (a) ângulo de *raster* de 45° e entre camadas de 90° , (b) Corpo de prova cuja geometria foi obtida da TO.



(a)



(b)

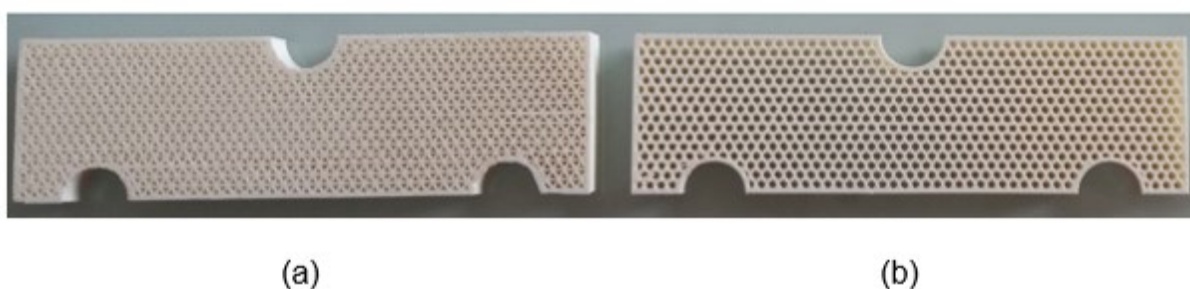
Fonte: Autoria própria

3.2.5 Corpos de prova (peças) com preenchimento celular

As peças com estrutura triangular e *tri-hexagon* tiveram suas massa reduzidas para 50% somente realizando a alteração do preenchimento no *software* Cura. A estrutura triangular foi escolhida por ser uma estrutura celular comum em componentes estruturais. Já a estrutura *tri-hexagon* foi utilizada por se aproximar do formato *honeycomb*, o qual é bastante comum em aplicações de engenharia, e uma vez que o *software* Cura não possui o padrão de *raster* para preenchimento *honeycomb*. O procedimento foi realizado sobre a geometria original. A Figura 37 apresenta essas peças.

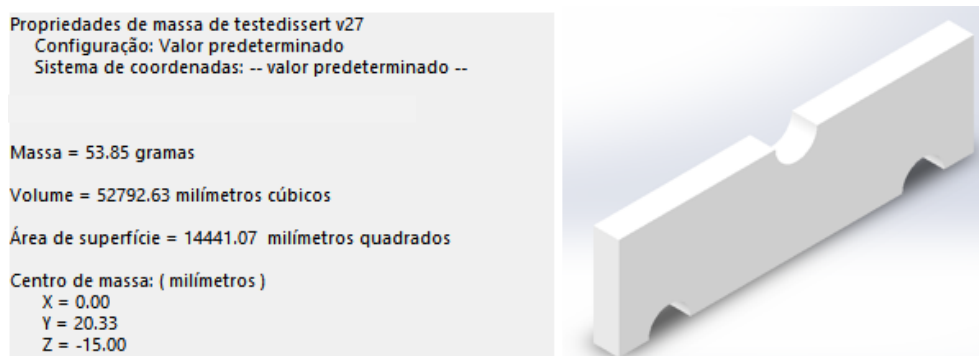
No projeto em CAD, a estimativa de massa com a peça em sua forma original é de 53,85 gramas, atribuindo-se as propriedades do material ABS (ver Figura 38).

Figura 37: (a) Corpo de prova da peça com 50% de preenchimento triangular, (b) corpo de prova da peça com 50% de preenchimento *tri-hexagon*.



Fonte: Autoria própria

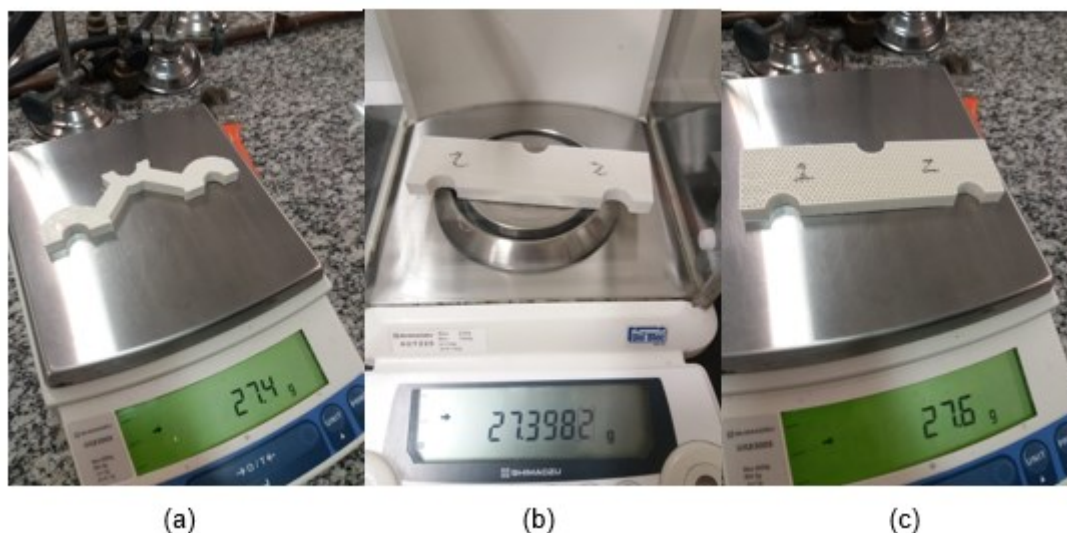
Figura 38: Modelo da peça no formato inicial e suas propriedades de massa.



Fonte: Autoria própria

As peças com redução de massa em 50% e a peça submetida a TO foram pesadas em uma balança de precisão conforme visto na Figura 39.

Figura 39: Massa das peças fabricadas: (a) geometria obtida por TO, (b) preenchimento triangular e (c) preenchimento *tri-hexagon*.



Fonte: Autoria própria

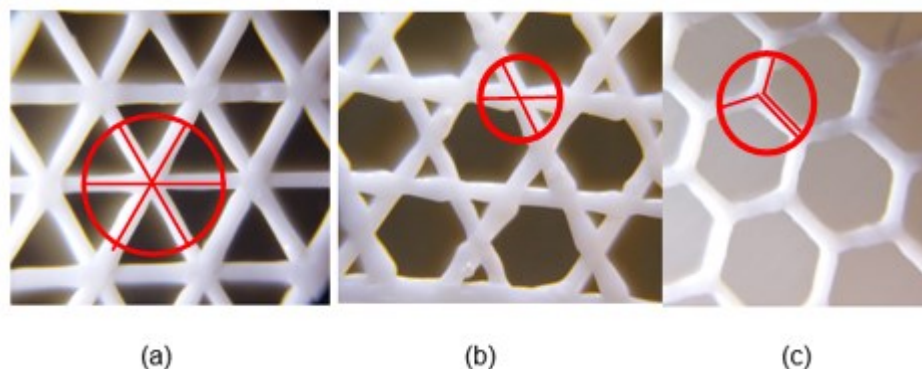
A pesagem das peças foi realizada com o intuito de analisar os resultados dos ensaios e obter a relação entre massa e rigidez, avaliada e discutida no Capítulo 4.

A estratégia de deposição de material durante a impressão das peças com redução de massa no preenchimento foi mantida conforme padrões do *software* Cura. Nota-se, durante a deposição de material, uma sobreposição entre filamentos de uma mesma camada. Na Figura 40 (a) e (b), a região circulada em vermelho tem como objetivo mostrar que os filamentos se cruzam em um ponto comum, gerando a sobreposição. Já na Figura 40(c), a região circulada demonstra que durante a deposição do *raster* os filamentos não se sobrepõe. Essa sobreposição pode ter influência na resistência da peça fabricada, sendo que esse aspecto não é explorado no presente trabalho. Isso serve como observação, uma vez que *softwares* de planejamento de processos diferentes podem gerar estratégias de deposição diferentes.

Como exemplo, citamos a estratégia *tri-hexagon* no *software* cura (Figura 40 (b)), e a estratégia de deposição hexagonal (*honeycomb*) “convencional” do *software* Matter Control que pode ser vista na Figura 40 (c). Percebe-se certa semelhança nas estruturas, mas o entrelaçamento entre os filamentos pode incrementar a

resistência da peça fabricada, tendo em vista que a adjacência entre os filamentos vista na estrutura honeycomb tradicional, pode gerar delaminação no sentido do esforço aplicado no presente estudo.

Figura 40: Estratégia de preenchimento: (a) Triangular, (b) *Tri-hexagon* e (c) *Honeycomb*.



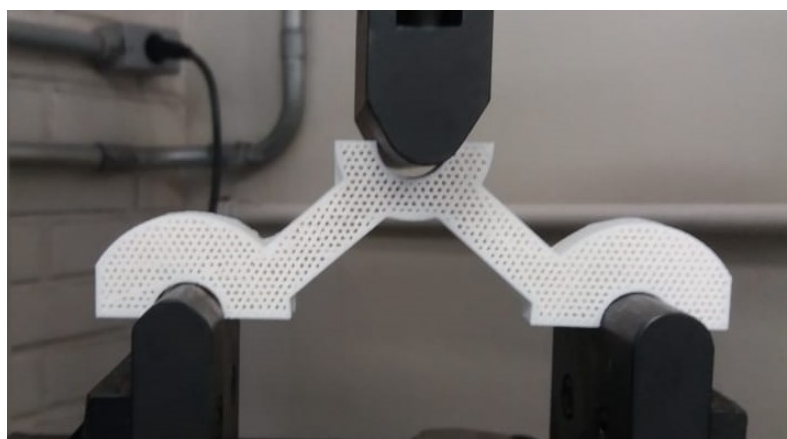
Fonte: Autoria própria.

3.2.6 Corpo de prova (peça) Híbrida

Foi também analisada a estrutura obtida por TO com preenchimento em 75% do tipo *tri-hexagon*, denominada de peça híbrida (Figura 41). Com os resultados obtidos pela TO e pelo preenchimento celular, foi realizado o estudo mesclando o melhor comportamento dentre o preenchimento celular com a melhor resistência mecânica, e a TO que obteve o melhor resultado dentre todas as peças.

Os parâmetros para fabricação da peça híbrida foram os mesmos demonstrados na Tabela 3.

Figura 41: Peça híbrida.



Fonte: Autoria própria.

Este teste adicional foi realizado para verificar a resistência relativa desta peça e comparar com os demais resultados. Como para as outras estruturas, foram fabricados quatro corpos de prova e submetidos a ensaio de flexão. Os resultados dos ensaios para a peça híbrida também são apresentados na Tabela 9 no capítulo 4.

Para a peça híbrida também foi realizada a análise por elementos finitos.

Figura 42: Massa peça híbrida.



Fonte: Autoria própria.

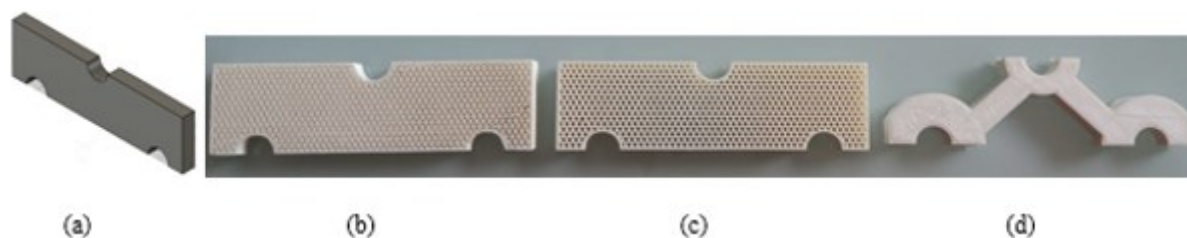
3.2.7 Ensaio de flexão de três pontos

Para o ensaio de flexão, foram produzidos doze corpos de prova: quatro com 50% de preenchimento triangular (Figura 43 (b)), quatro com 50% de preenchimento *tri-hexagon* (Figura 43 (c)), e quatro com a geometria obtida da otimização topológica com 50% de massa (Figura 43 (d)). Todos os percentuais são relacionados à peça inicial (Figura 43 (a)). Para a peça híbrida foram seguidos os mesmos procedimentos e quantidade de fabricação.

O intuito do trabalho é realizar a simulação de aplicação de uma peça submetida ao esforço descrito e, portanto o ensaio de flexão utilizado não é normatizado.

Para fins deste estudo, considerou-se que, hipoteticamente, a peça original (Figura 43 (a)) necessita manter seu formato inicial e suportar uma carga de flexão de 5 kN conforme a Figura 44. Para tanto, a rigidez deve ser otimizada e a massa reduzida para 50% da inicial, como visto no item 3.2.3.

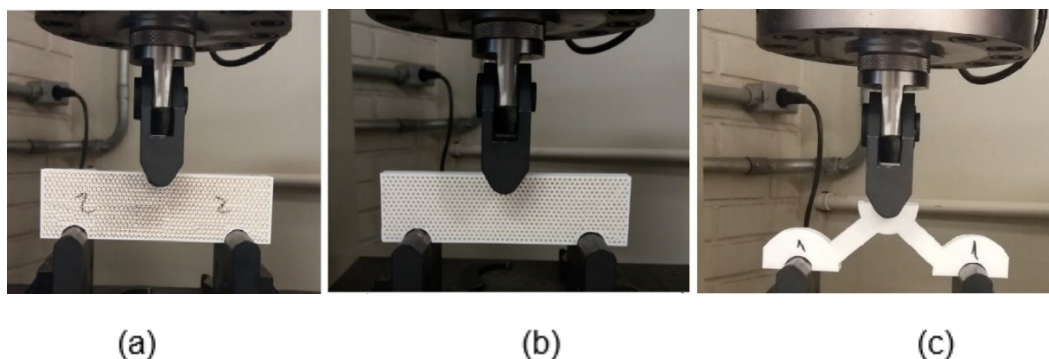
Figura 43: Peça inicial (a) e corpos de prova com: estrutural celular triangular e 50% de preenchimento (b), estrutura celular *tri-hexagon* e 50% de preenchimento (c) e otimizado via TO com 50% da massa original (d).



Fonte: Autoria própria.

O ensaio de flexão foi realizado com uma pré-carga de 3 kgf para todos os corpos de prova. Os valores do deslocamento experimental foram obtidos com a utilização de um relógio comparador na base da peça.

Figura 44: Ensaio de flexão de três pontos em peça com preenchimento (a) triangular, (b) *tri-hexagon* e (c) geometria obtida por TO.



Fonte: Autoria própria

3.2.8 Análise de deslocamento por elementos finitos

Para efeito de consolidação dos resultados, as estruturas foram submetidas a análise por elementos finitos (FEA), no *software* Fusion 360. Como parâmetros de material foram utilizados os mesmos da TO.

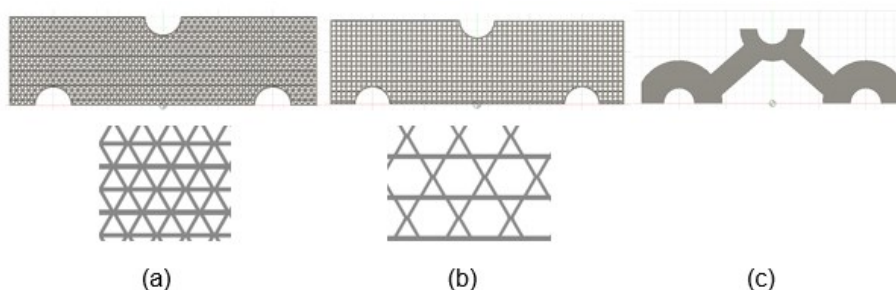
De modo a obter resultados como base para comparação com os métodos de otimização, foi realizado um estudo numérico na peça inicial sem TO.

Para a peça não originária da TO, foi atribuído o material de fabricação em ABS. Foi simulado no *software* Cura a sua fabricação com os parâmetros da Tabela 3 e 100% de preenchimento. Além disso, realizou-se a FEA da peça de modo a ter um parâmetro de base para os resultados de deslocamento e distribuição de

tensões na peça, para efeitos comparativos com os corpos de prova que foram impressos e ensaiados experimentalmente.

Os corpos de prova foram desenhados no *software* Fusion 360 baseados nos modelos que foram fabricados por manufatura aditiva. As peças impressas foram medidas e as células foram replicadas por um padrão linear. Foram atribuídos aos modelos as mesmas propriedades do material ABS utilizadas para realização da TO, detalhadas na Subseção 3.2.4. Os modelos desenhados podem ser vistos na Figura 45.

Figura 45: (a) Peça desenhada com preenchimento triangular, (b) peça desenhada com preenchimento *tri-hexagon*, (c) peça desenhada com geometria obtida da TO.



Fonte: Autoria própria

As propriedades da malha referente a número de nós e número de elementos para cada peça, estão detalhadas na Tabela 6.

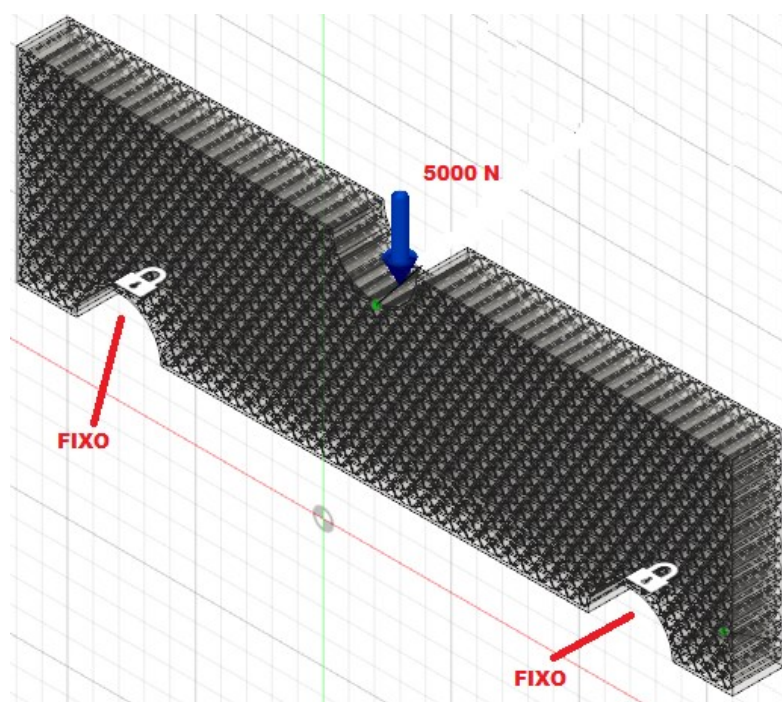
No *software* as condições de simulação são as mesmas para todos os corpos de prova. A força aplicada é de 5 KN, e os apoios são fixos em relação a x, y e z, como demonstrado na Figura 46.

Tabela 6 - Número de nós e número de elementos do FEA.

Tipo de estrutura	Número de Nós	Número de elementos
Peça original 100%	178597	122844
Triangular 50%	189270	103707
<i>Tri-hexagon</i> 50%	38584	135071
Otimização topológica	88692	59593
Peça híbrida 75% <i>Tri-hexagon</i> / TO	341387	196503

Fonte: Autoria própria.

Figura 46: Condições de apoio e aplicação de força para análise por FEA.



Fonte: Autoria própria

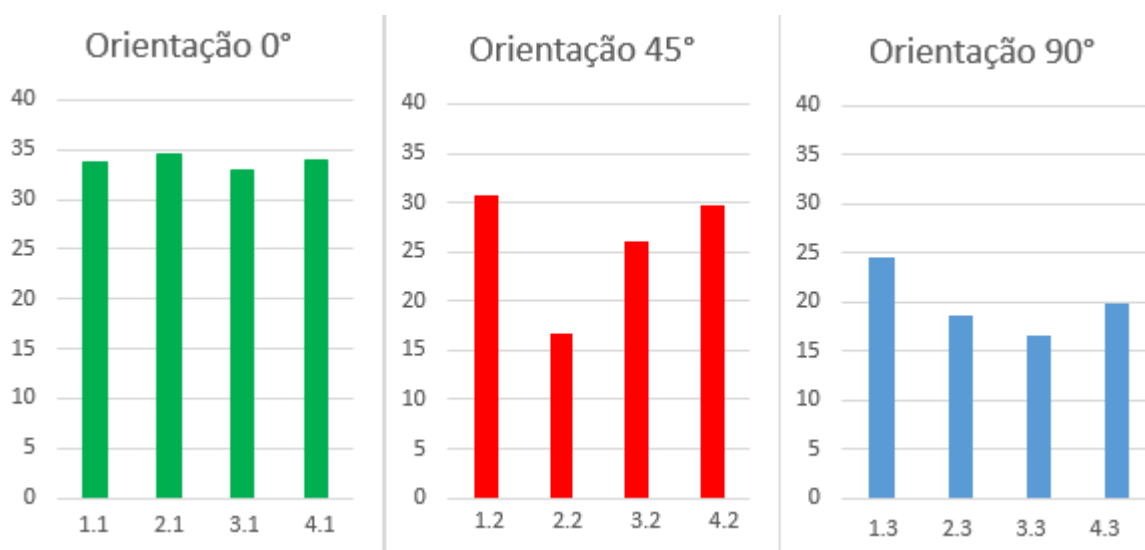
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são demonstrados os resultados referentes à caracterização do material ABS, ao ensaio de flexão das peças e o resultado da análise por elementos finitos destas. As discussões pertinentes aos resultados obtidos foram baseadas na fundamentação teórica e na observação dos resultados.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL ABS

As tensões máximas obtidas no ensaio de tração em cada ângulo de *raster* para os doze corpos de prova estão dispostas na Figura 47 (valores em MPa). A Figura 48 mostra esquematicamente o *raster* a 45° e 90°, e será discutida posteriormente. Os gráficos de tensão *versus* deformação podem ser vistos na Figura 49. Os resultados para orientação a 45°, no corpo de prova 2.1, mostram um valor de tensão máxima bem inferior aos demais. Foram utilizados os mesmos parâmetros de fabricação em todas as peças, porém sem controle de temperatura ambiente e umidade. Essa diferença pode estar relacionada com um fator na fabricação em específico dessa peça, devido a algum pico de temperatura ou defeito de preenchimento, ou outro fator que não esteja relacionado ao processo como falha no material comprado.

Figura 47: Tensões máximas em MPa, obtidas no ensaio de tração



Fonte: Autoria própria

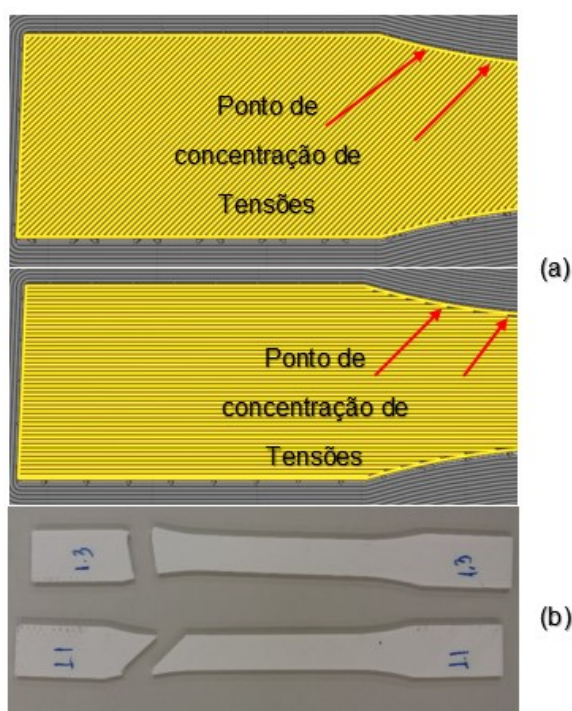
Para uma melhor visualização e interpretação dos resultados, os dados foram tratados. Assim obtêm-se as tensões médias e as correspondentes deformações de engenharia, como pode ser visto na Figura 50.

Para fins de estudo e comparação, os resultados obtidos nos ensaios foram compilados em um único gráfico, com a linha de tendência tracejada com cor vermelha, conforme pode ser visualizado na Figura 51.

Os resultados obtidos demonstram pouca discrepância entre os módulos de elasticidade para as três direções analisadas, como pode ser observado na Figura 50, tendo como base a inclinação das curvas. Porém, há uma grande variação na tensão máxima.

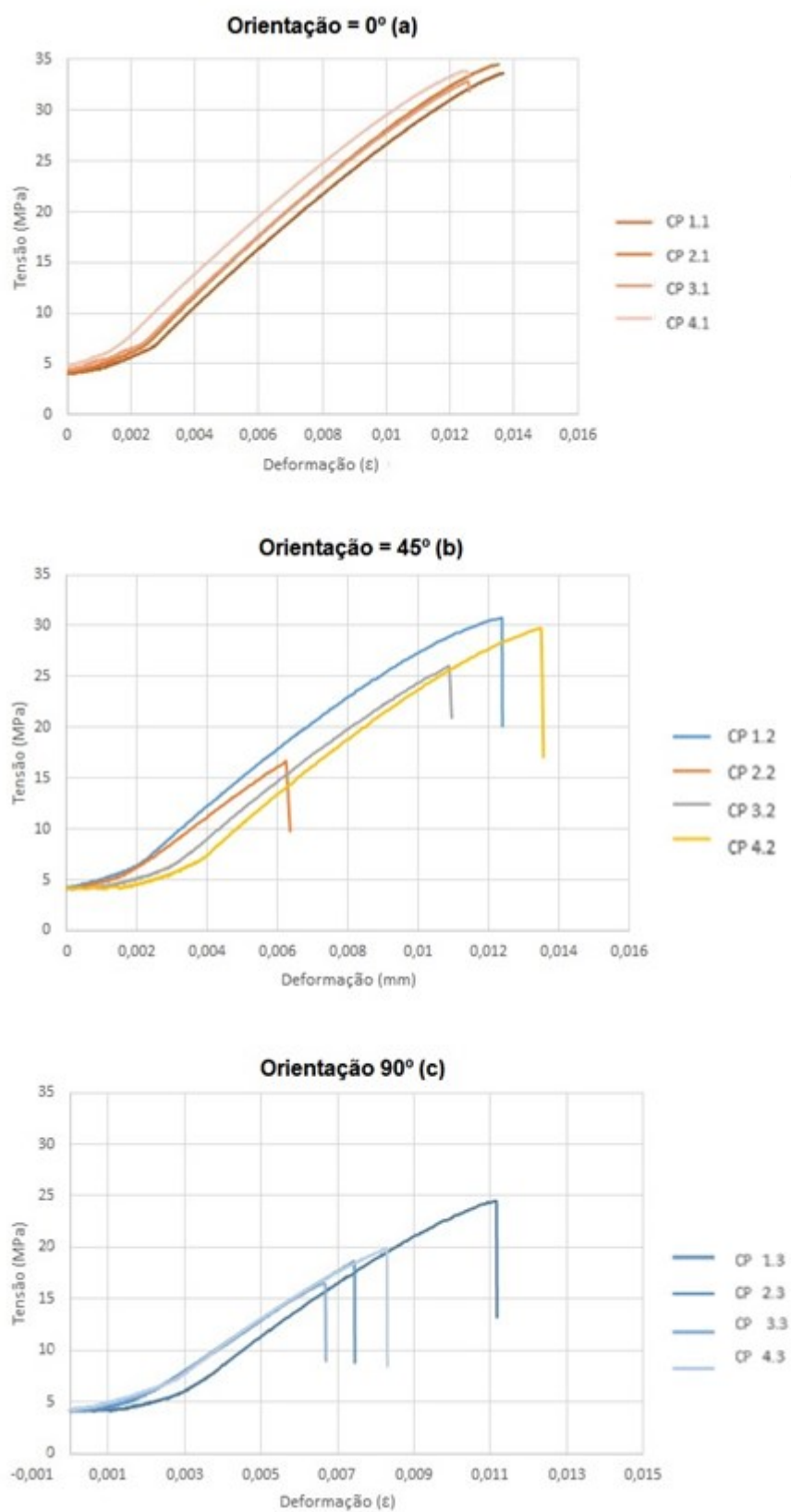
Os resultados dos ensaios de tração mostraram que as fraturas observadas tiveram característica frágil, de pouco alongamento, conforme visto na Figura 48 (b). Ahn et al. (2002) citam que os vazios gerados nas inversões de direção do zig-zague do preenchimento, principalmente nos corpos de prova em 45° e 90°, causam grande concentração de tensão nos raios dos corpos de prova, conforme visto na Figura 48 (a). Isso causa a fratura na região onde essas concentrações estão presentes.

Figura 48: Análise da fratura dos corpos de prova (a) visão esquemática do *raster* a 45° e 90° no *software* Cura e (b) corpos de prova submetidos a tração.



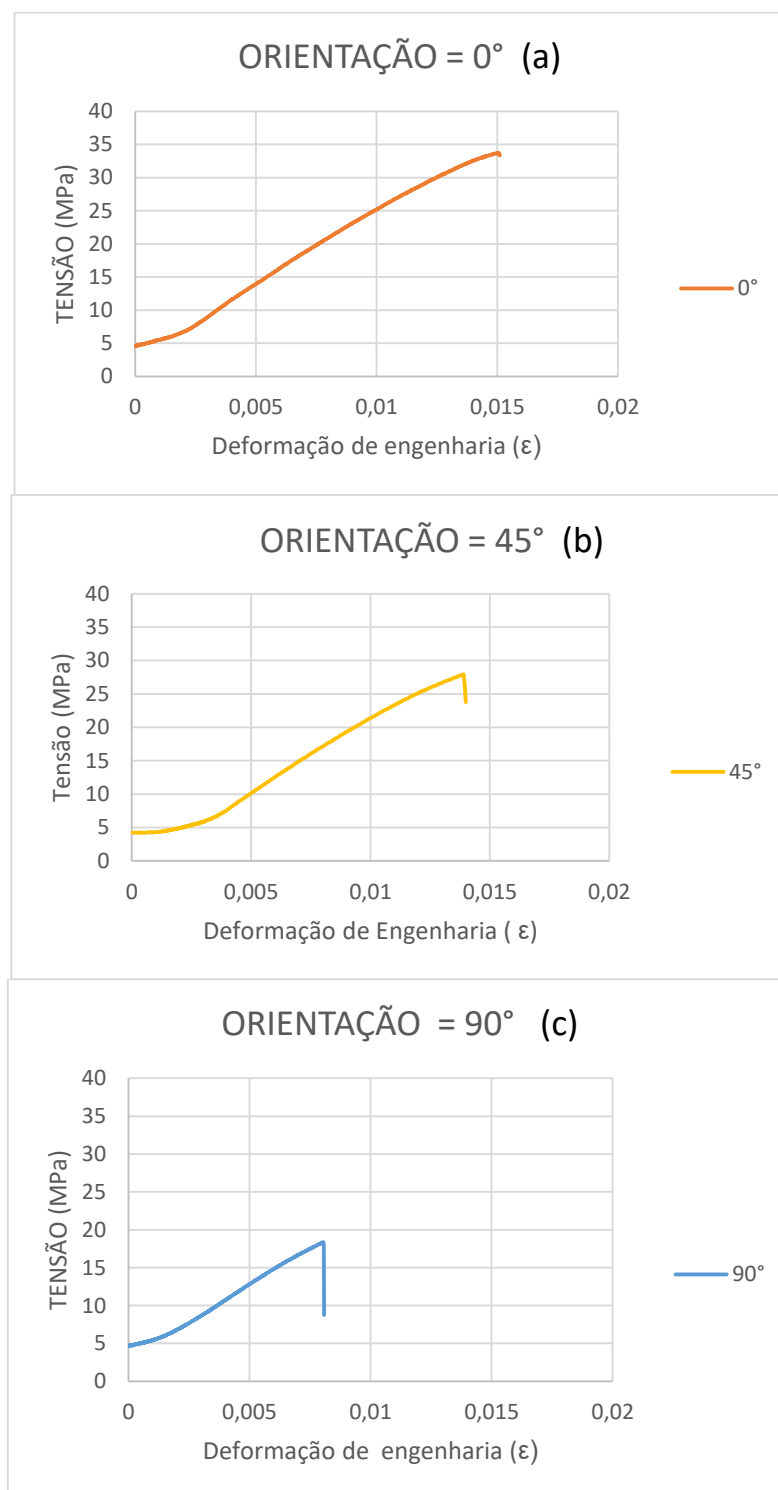
Fonte: Autoria própria.

Figura 49: Diagrama tensão – deformação dos corpos de prova em ABS com diferentes ângulos de *raster* de deposição de camadas.



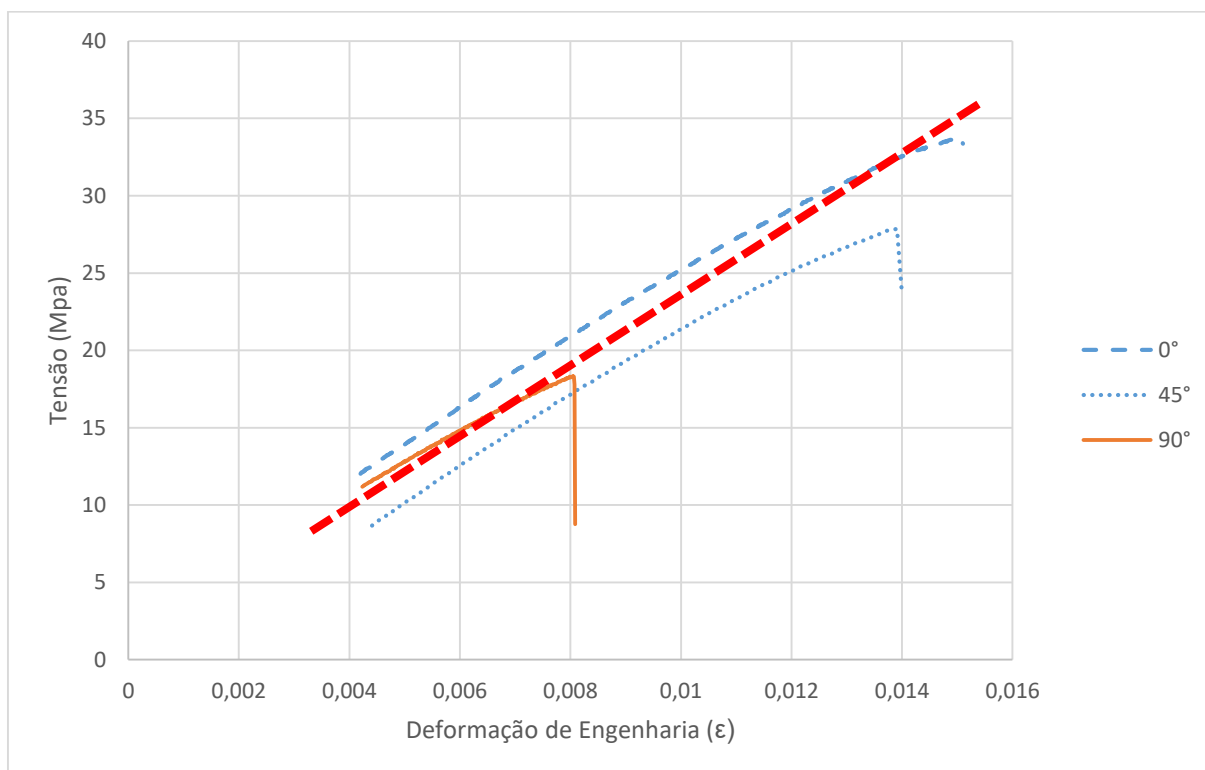
Fonte: Autoria própria

Figura 50: Diagrama tensão – deformação média dos corpos de prova em ABS (a) raster a 0°, (b) raster a 45° e (c) raster a 90°.



Fonte: Autoria própria

Figura 51: Diagrama tensão – deformação comparativo entre as três orientações de deposição (valores médios), com linha de tendência em vermelho.



Fonte: Autoria própria

Analisando numericamente os valores obtidos pelo ensaio de tração, a Tabela 7 demonstra os resultados das propriedades de módulos de elasticidade e deformação máxima para as orientações de *raster* dos corpos de prova.

A peça estudada neste trabalho é solicitada por flexão na direção transversal em relação ao empilhamento das camadas. Sendo assim, a anisotropia é de difícil caracterização e aplicação na TO, pelo fato do Fusion 360 não apresentar um módulo para AM ou um campo para inserção de propriedades anisotrópicas. Isso também foi observado em outros trabalhos citados no Capítulo 3.

Dessa forma, para o presente trabalho, o material foi considerado isotrópico na TO, algumas características, implicações e resultados inerentes à essa escolha são discutidos no Capítulo 5.

Tabela 7 - Módulos de elasticidade médios e seus respectivos desvios padrões e deformação máxima média do material ABS para as orientações de *raster* 0°, 45° e 90°

Orientação	Módulo de Elasticidade Médio	Desvio Padrão	Deformação máxima (ϵ)
0°	2,39 GPa	$\pm 0,07$	0,0151
45°	2,07 GPa	$\pm 0,13$	0,0139
90°	2,50 GPa	$\pm 0,14$	0,0081

Fonte: Autoria própria.

4.2 ANÁLISE NUMÉRICA DA PEÇA SEM TO

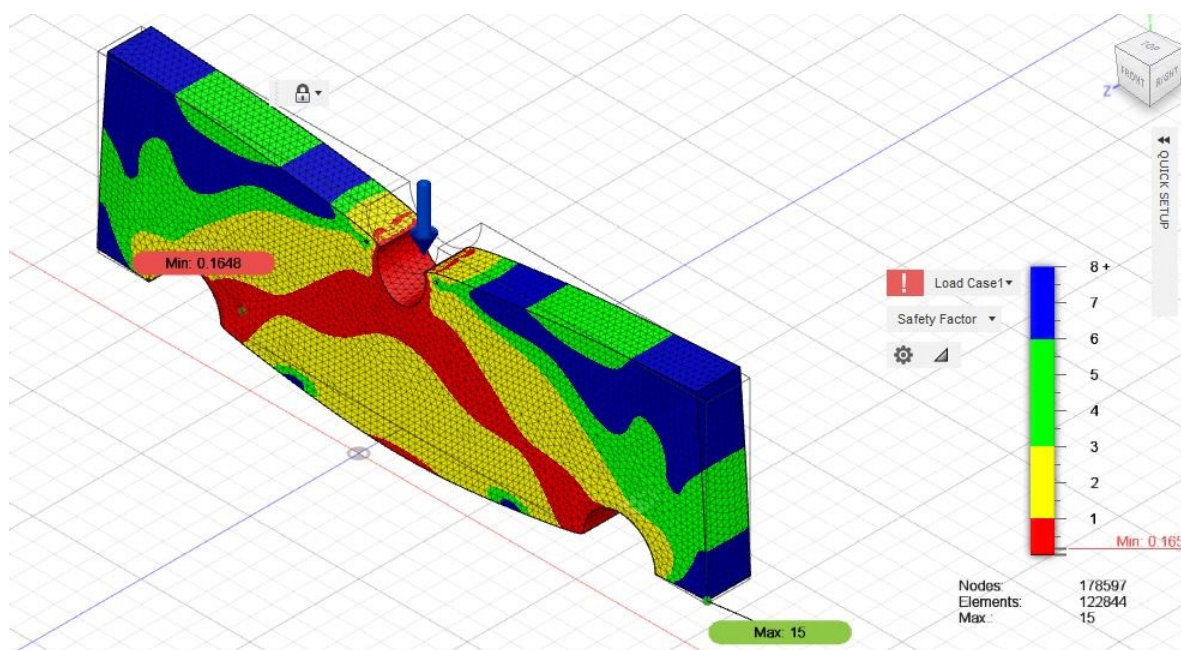
Os resultados da análise numérica para a peça sem TO são apresentados na Tabela 8. Além da FEA da peça (Figura 52), também é apresentado o tempo estimado e a massa estimada de material a ser utilizado na impressora 3D para fabricação da peça.

Tabela 8 – Análise numérica da peça sem To.

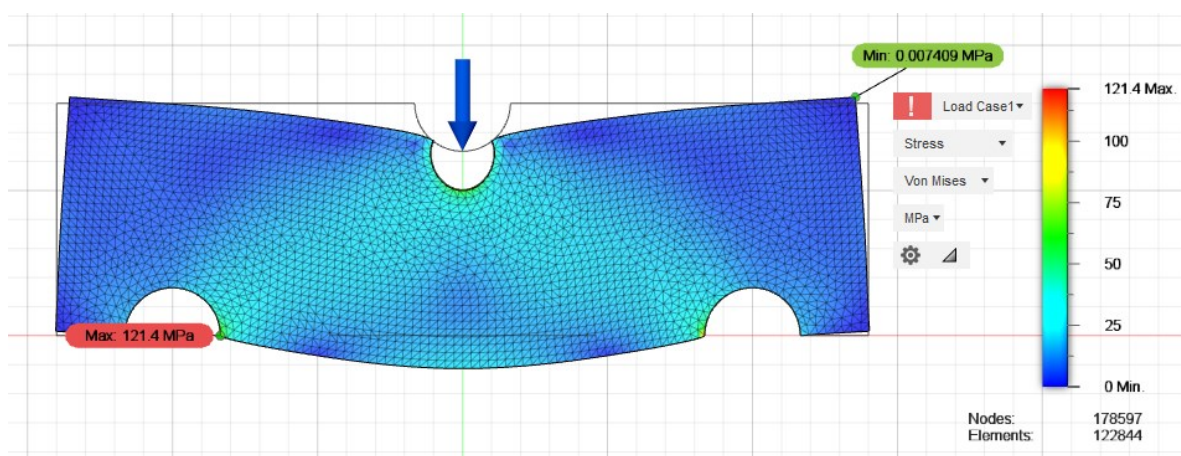
Tipo de Estrutura	Tempo estimado de fabricação no <i>software</i> Cura (horas)	Massa estimada no <i>software</i> Cura (g)	Deslocamento máximo via FEA (mm)
Peça inicial 100% de preenchimento	6,3	59	0,99

Fonte: Autoria própria.

Figura 52: FEA da peça inicial em ABS com 100% de preenchimento (a) Fator de Segurança, (b) Tensões de vonMises.



(a)



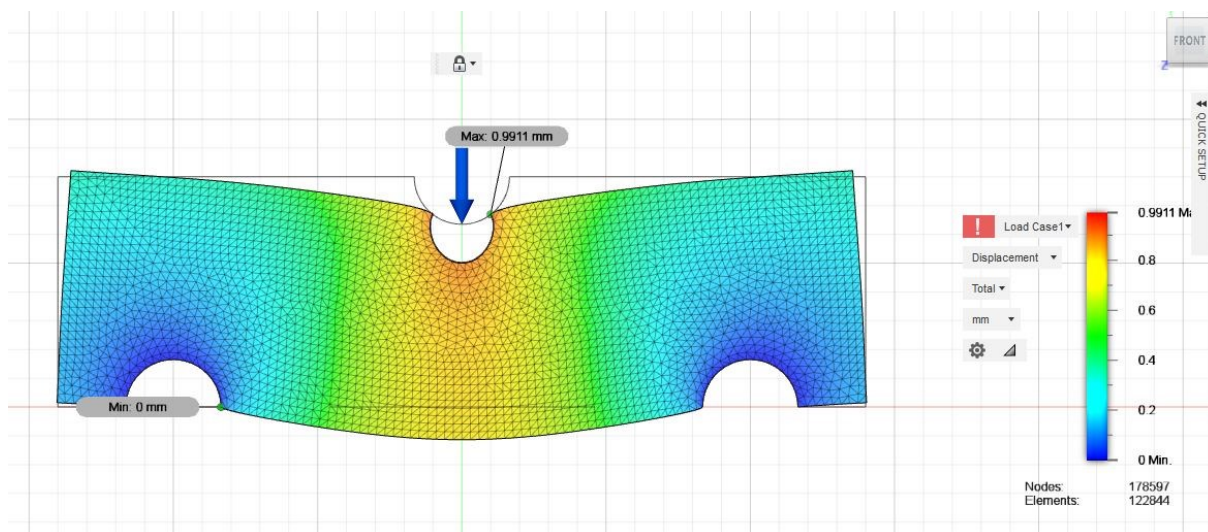
(b)

Fonte: Autoria própria.

Verifica-se, via FEA, que as linhas do fator de segurança mínimo (em vermelho na Figura 52 (a)), bem como a tensão máxima da peça (Figura 52 (b)), estão inclinadas em concordância com a região da aplicação da carga em direção com os apoios. As linhas em vermelho se assemelham à geometria obtida por TO.

O deslocamento máximo ocorre na parte central da peça, sendo que as laterais sofrem os valores mínimos de deslocamento vertical, como visto na Figura 53.

Figura 53: Campo de deslocamento, obtido via FEA, da peça em ABS com 100% de preenchimento.



Fonte: Autoria própria.

As informações da análise numérica da peça sem TO servem de referência para comparações e discussões presentes na sequência deste trabalho.

4.3 FLEXÃO DA PEÇA OTIMIZADA E PEÇAS COM PREENCHIMENTO CELULAR

Os resultados (médios) de tempo de fabricação, massa, resistência à flexão e resistência relativa carga/massa, obtidos na fabricação e nos ensaios de flexão de três pontos das peças com as diferentes estruturas/estratégias, podem ser vistos na Tabela 9.

Comparando com a análise numérica da peça sem TO e com preenchimento de 100%, todas as peças obtiveram melhor resultado tanto no tempo de fabricação quanto na redução de massa. Os resultados numéricos da Tabela 8 em comparação com a Tabela 9 mostram que a peça sem TO totalmente preenchida possui um deslocamento 62% menor que a peça submetida a TO. Essa peça na análise numérica, apesar de ter as propriedades do ABS, foi considerada homogênea e isotrópica, assim como todas as outras análises computacionais.

Tabela 9 - Valores médios e correspondentes desvios padrões obtidos nos ensaios de flexão das diferentes peças

Tipo de estrutura	Tempo de fabricação (h)	Desv. pad.	Massa (g)	Desv. pad.	Resist. à flexão (N)	Desv. pad.	Resist. relativa Carga /massa (N/g)
Triangular 50%	2,80	0,02	27,46	0,47	1873,70	161,45	68,23
<i>Tri-hexagon</i> 50%	2,70	0,02	27,55	0,56	2079,70	180,64	75,49
Otimização topológica	2,10	0,01	27,35	0,45	3884,80	114,91	142,04
Peça híbrida 75% <i>Tri-hexagon</i> / TO	1,60	0,01	19,7	0,31	2266,10	163,57	114,03

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que peça com formato obtido por TO apresentou a maior resistência e a maior relação resistência/massa. Apesar da otimização topológica aqui utilizada ter considerado o material isotrópico, para o caso da AM por extrusão de material, ela se mostrou uma técnica eficiente para o tipo de esforço que foi aplicado na peça.

Verifica-se que a TO foi relevante para o aumento na resistência da peça fabricada, uma vez que suportou em torno de duas vezes mais carga, como visto na Tabela 9, se comparado as estruturas celulares. Além disso, a esta se mostrou eficiente no que se refere ao tempo de fabricação das peças, como também pode ser observado na Tabela.

A repetitividade dos resultados, com valores próximos de um ensaio para outro (desvio padrão da Tabela 9), mostram que o material tem um comportamento, até certo ponto, previsível para os parâmetros de processo utilizados e para a aplicação de carga no sentido paralelo ao empilhamento.

O preenchimento *tri-hexagon* se mostrou mais eficiente que o triangular em termos de resistência nos ensaios. Isso pode estar relacionado com a sobreposição de filamentos, além da combinação de duas estruturas de preenchimento (triângulos e hexágonos) no mesmo plano, conforme visto na Figura 40.

As peças com preenchimento foram fabricadas utilizando um perímetro de espessura (0,4mm) e os parâmetros de fabricação da Tabela 3. Esse contorno pode ter influenciado no aumento da resistência a flexão dos corpos de prova.

Levando em conta os resultados obtidos para as peças somente com redução de preenchimento percentual pelo *software* de planejamento de processo, a peça submetida a TO com preenchimento de 75%, obteve resultados satisfatórios, tendo uma resistência a flexão similar, porém com 29% menos massa a peça submetida a TO. O resultado reforça a eficiência da TO quanto a obtenção de geometrias com melhor desempenho em termos de resistência, mesmo com uma estrutura de preenchimento celular.

4.4 ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS DAS PEÇAS IMPRESSAS

Após a realização da análise por elementos finitos, os resultados podem ser vistos na Tabela 10.

Percebe-se quando comparada a Tabela 10 com a Tabela 8, que existe uma diferença no deslocamento via FEA de 37,7% entre a peça sem TO e a peça submetida a TO. Levando em conta que existe uma redução de cerca 50% da massa total da peça, o resultado da TO é significativa.

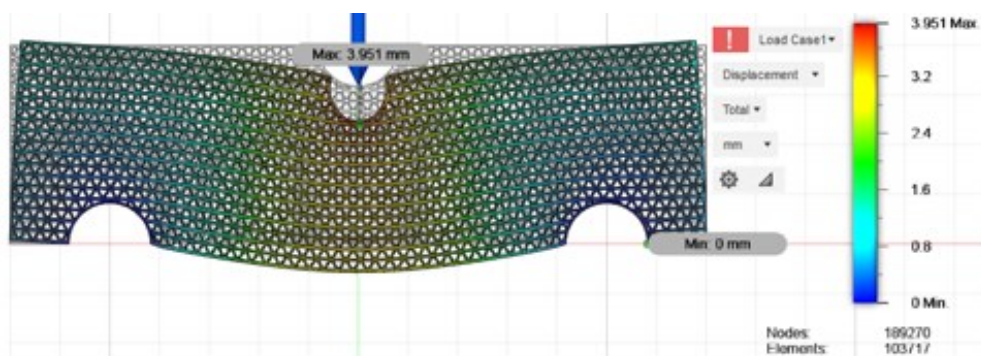
Tabela 10 - Valores de deslocamentos máximos obtidos nos ensaios experimentais e via FEA das peças.

Tipo de Estrutura	Desloc. máximo experimental (mm)	Desvio padrão (mm)	Desloc. máximo via FEA (mm)
Triangular 50%	4,35	0,17	3,95
<i>Tri-hexagon</i> 50%	3,51	0,25	3,83
Otimização topológica	1,62	0,14	1,59
Peça Híbrida 75% <i>Tri-hexagon</i> / TO	2,73	0,16	2,53

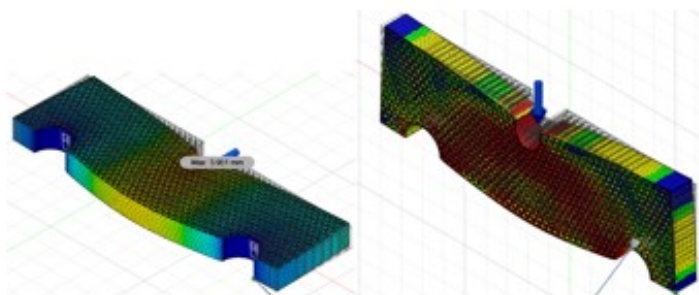
Fonte: Autoria própria.

Para o corpo de prova com preenchimento triangular, o resultado da simulação via FEA é apresentado na Figura 54. Nesta figura, pode ser observado que o deslocamento máximo se dá entre os apoios (Figura 54 (b)). Com base no “fator de segurança” obtido por FEA (Figura 54 (c)), a região mais propensa à falha é sinalizada pela cor avermelhada, sendo que a fratura da peça submetida ao ensaio (Figura 54 (d)) aconteceu na região prevista pela simulação. A ruptura se iniciou na parte inferior da peça, se propagando até o cutelo que aplicava a força. A fratura foi repentina e com característica frágil (a peça quebrou de uma vez) com propagação de trinca somente no local da fratura.

Figura 54: Resultados da FEA da peça com preenchimento triangular: (a) e (b) deslocamentos, (c) fator de segurança e (d) instante da falha no teste experimental.

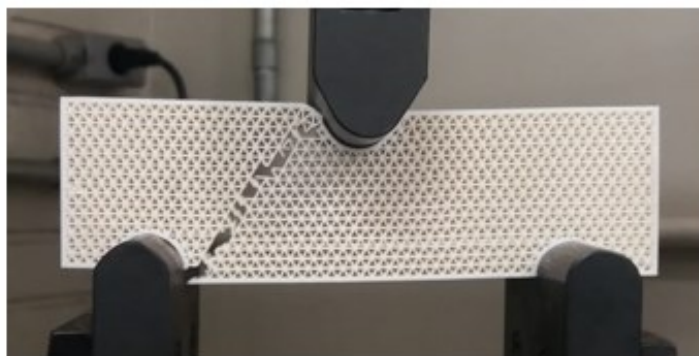


(a)



(b)

(c)

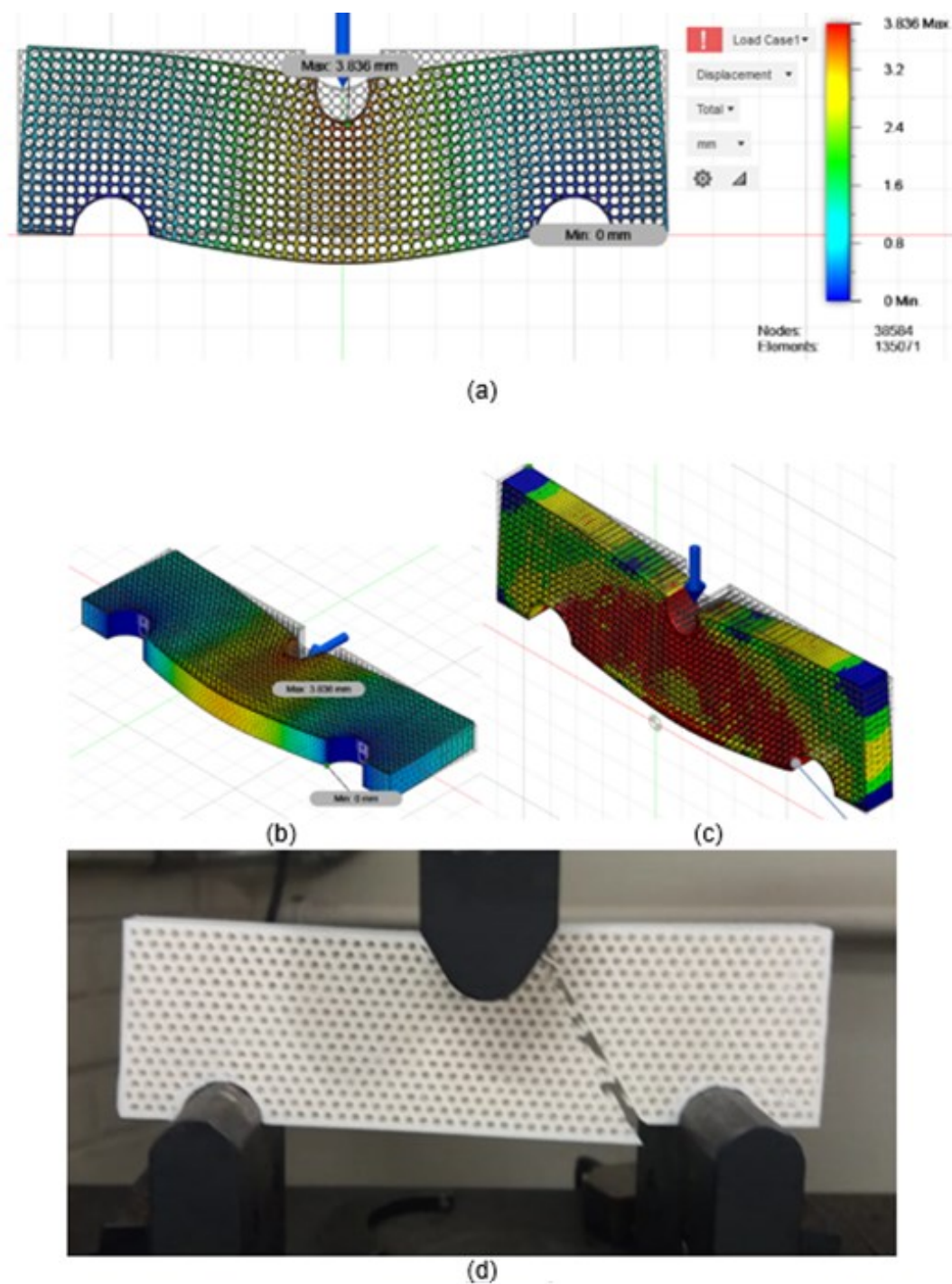


(d)

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da FEA e do ensaio de flexão da peça com preenchimento *tri-hexagon* estão apresentados na Figura 55.

Figura 55: Resultados da FEA da peça com preenchimento *tri-hexagon*: (a) e (b) deslocamentos, (c) fator de segurança e (d) instante da falha no teste experimental.



Fonte: Autoria própria.

A peça com preenchimento *tri-hexagon* teve um desempenho melhor quanto à resistência à flexão até a sua ruptura. Isso pode ser justificado por essa estrutura

aliar características do preenchimento *honeycomb* e pequenas estruturas triangulares, como visto na Figura 40 (b). A fratura teve características semelhantes à apresentada na estrutura triangular em todos os corpos de prova. A região que sofreu fratura (Figura 55 (d)), foi sinalizada na simulação (Figura 55 (c)) como a região com menor “coeficiente de segurança”. O deslocamento máximo foi menor em relação à estrutura triangular antes da falha.

Os resultados para a peça submetida a TO podem ser vistos na Figura 56. É possível visualizar que a peça apresenta um maior carregamento na região em vermelho, visto na Figura 56 (c). Como visto na Figura 52 (a), a peça original teria uma maior solicitação na mesma região, porém com a forma otimizada, o carregamento se concentra e torna esse ponto crítico na peça com TO.

Na Figura 56 (d), é possível visualizar a fratura acontecendo da face interior do apoio da peça, até a parte externa daquela região. A região da fratura, é uma região de transição entre um fator de segurança mínimo (em vermelho) e uma região com um fator de segurança maior (em amarelo), como visto na Figura 56 (c), sendo assim, era o local propício ao acontecimento da falha, devido a esse diferencial.

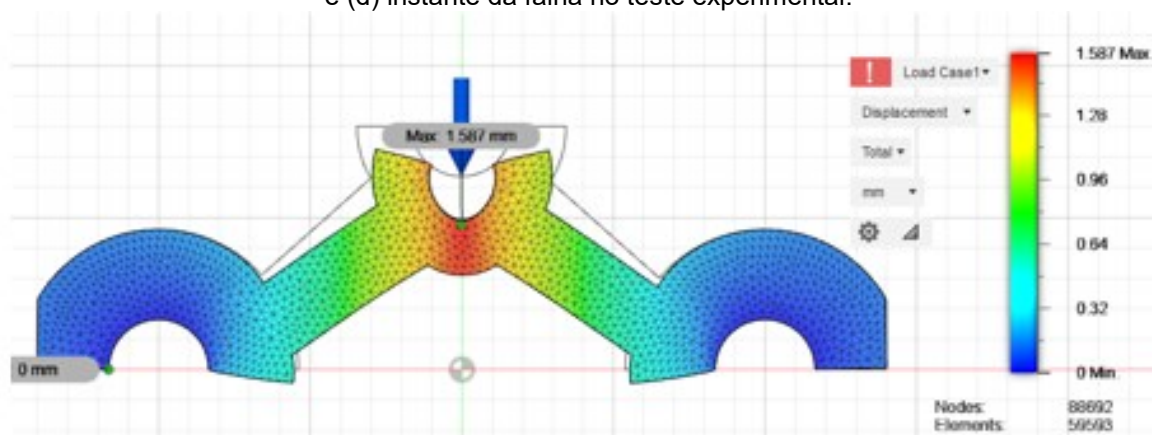
Essa peça apresentou melhor desempenho, isto é, maior resistência e maior rigidez, tanto na simulação numérica como nos testes experimentais. Destaca-se também que o desvio padrão da carga e do deslocamento máximo foram menores nessa peça. Isso pode ter relação com a forma de construção da peça com 100% de preenchimento, que, apesar da construção em camadas, possui um efeito de anisotropia reduzido.

A peça apresentou um deslocamento vertical antes da ruptura, além disso a fratura se deu com a propagação de uma trinca e foi interrompido antes da ruptura total da peça.

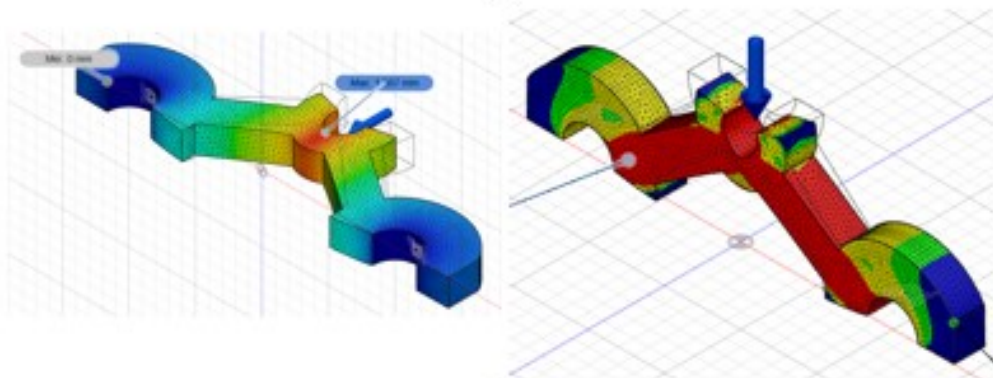
A peça híbrida apresentou um deslocamento menor do que aqueles das peças com preenchimento celular somente, e teve uma resistência menor do que a peça obtida da TO, com preenchimento 100%.

Isso reforça a teoria vista na Seção 2.4, onde os autores Clausen, Aage e Sigmund (2016), analisam peças com um outro polímero, e destacam que a TO aliada à preenchimento celular tende a otimizar a rigidez da peça fabricada.

Figura 56: Resultados da FEA da peça obtida por TO: (a) e (b) deslocamentos, (c) fator de segurança e (d) instante da falha no teste experimental.

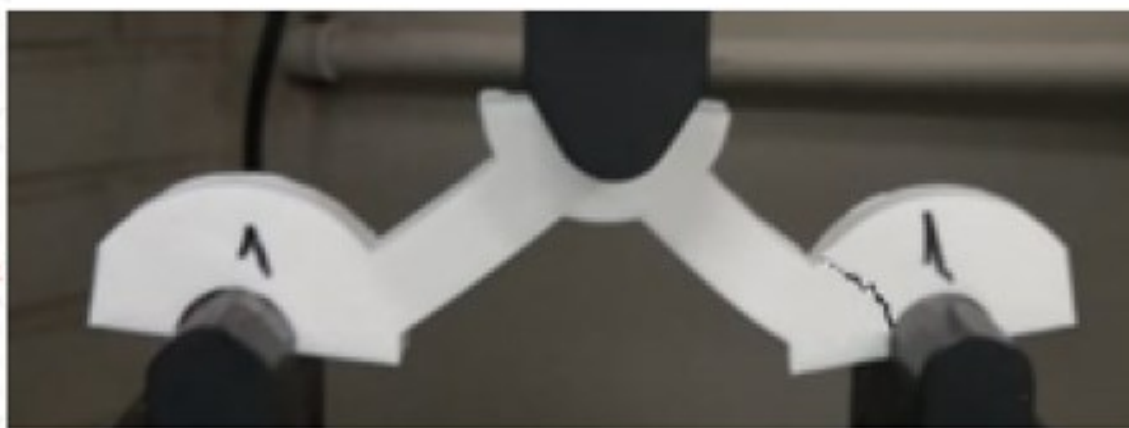


(a)



(b)

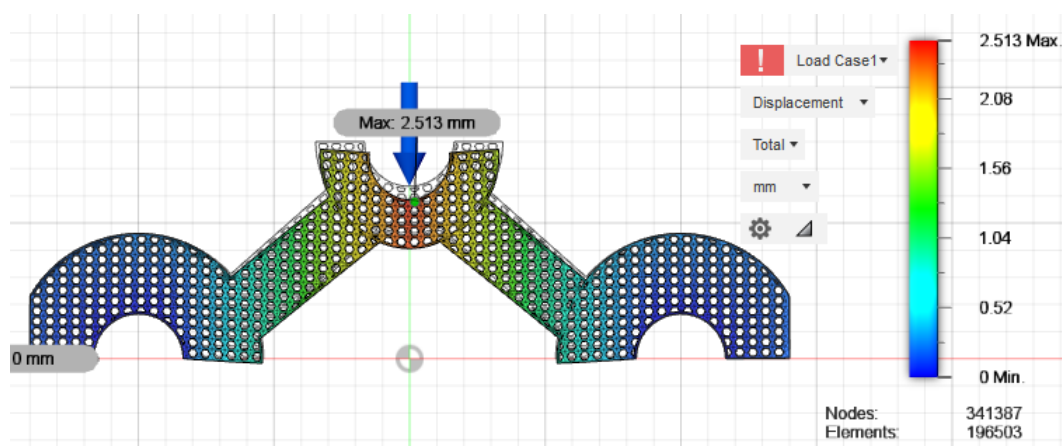
(c)



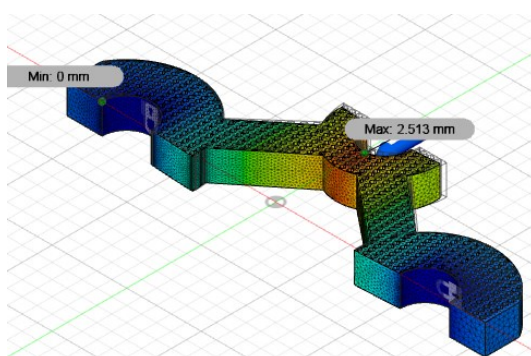
(d)

Fonte: Autoria própria.

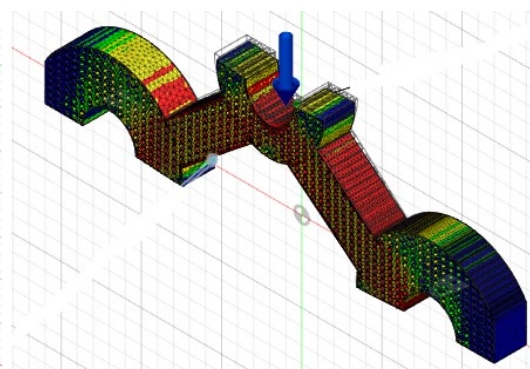
Figura 57: Resultados da FEA da peça híbrida: (a) e (b) deslocamentos, (c) fator de segurança e (d) instante da falha no teste experimental.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autoria própria.

Na análise de FEA, o contorno das peças (casca), incrementa a resistência por ser um elemento de barra ligado diretamente com os demais elementos, tornando o material homogêneo e isotrópico. Isso não ocorre na AM pois, o raster entre o preenchimento e o contorno, cria um gap. Esse gap é menos evidente, tão quanto menor é, como é citado no Capítulo 2, na seção 2.2, com os autores

Dawoud, Taha e Ebeid (2016). Tendo em vista os métodos adotados para calibração da impressora no capítulo 3, na seção 3.2.1, houve uma preocupação no procedimento visando reduzir espaços vazios entre filamentos.

Para tanto, os análises obtidas por FEA servem como base para a análise dos resultados apresentados, levando-se em conta os detalhes apresentados anteriormente. A relação da influência do número de contornos na resistência da peça é proposta para trabalhos futuros.

5 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos, percebe-se que a otimização topológica é uma ferramenta eficiente e com campo de aplicação e estudo para a AM por extrusão de material. Porém esta situação deve ser utilizada em casos específicos e com o estudo de projeto da peça a ser fabricada, pois nem todos os componentes mecânicos sofrem solicitações somente no plano X-Y, como no presente estudo.

A relação entre resistência à flexão e massa teve um resultado significativo a favor da TO do que quando se optou por somente pela redução do preenchimento da peça original. É nítida a eficiência da TO também na resistência e tempo de fabricação. Com relação a resistência relativa, a TO obteve em média um resultado 48,07% melhor do que a peça com preenchimento celular com melhor desempenho (*tri-hexagon*), e um deslocamento 46,15% menor. Em relação ao tempo de fabricação, a peça por TO foi 22,22% menor que a peça com preenchimento celular com melhor desempenho.

Os resultados do presente estudo contribuem para a TO e a AM em extrusão de material, assim como para o estudo da obtenção de peças para uso fim na indústria em geral.

Verificou-se que a utilização da TO com o preenchimento *tri-hexagon* teve resultados mais eficientes que os modelos sem TO. A peça com preenchimento *tri-hexagon* resistiu melhor à flexão nos ensaios, em relação àquela com preenchimento triangular, e, mesclando com a TO em uma peça “híbrida”, obteve-se resultados satisfatórios de peso e tempo de fabricação.

Constatou-se também que os resultados da FEA, apesar das várias hipóteses adotadas, foram satisfatórios. Os motivos que levam a possíveis desvios podem estar relacionados a anisotropia do material, porém com os parâmetros utilizados para a TO os desvios são aceitáveis, levando-se em conta a tecnologia AM para a fabricação das peças

Para a solicitação mecânica e a geometria estudada, a deposição do *raster* a 45° nas peças, coincide com a distribuição de tensão para a solicitação. Portanto, a anisotropia para esta situação é menos evidenciada. Para uma geometria diferente a anisotropia poderia ser mais evidente.

Como contribuição, demonstrou-se o comportamento de uma peça com geometria obtida por TO submetida a flexão, com parâmetros de processo definidos

e fabricada por AM por extrusão de material, visando o uso de peças em aplicações finais na indústria uma vez que muitos componentes de baixa complexidade geométrica submetidas a esforços no plano X-Y podem ser encontrados em equipamentos ou dispositivos industriais.

Os conceitos de TO e a AM para obtenção de peças para utilização na indústria podem ser aplicados com baixo custo e de maneira simplificada para peças de baixa complexidade. Diferente de outros estudos, a peça do presente estudo foi fabricada sem a utilização de suportes, utilizaram-se *softwares* gratuitos para a otimização e planejamento de processo, o ABS utilizado foi obtido por um distribuidor nacional e foi utilizada uma impressora *open source* para a obtenção dos modelos.

TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se o estudo da influência de parâmetros na resistência de peças impressas, como por exemplo, o número de contornos, outros tipos de preenchimentos além do triangular e do *tri-hexagon*. A alteração do *raster*, diâmetro do bico e temperaturas de deposição de material também são fatores a serem explorados.

O estudo da anisotropia em FEA também pode ser realizado para incrementar a pesquisa. Uma vez levada em conta a anisotropia, a resposta da peça na simulação numérica se aproximaria ainda mais do comportamento real.

Também sugere-se a utilização de outros materiais além do ABS, para uma comparação do comportamento mecânico dos mesmos.

REFERÊNCIAS

- AL-GHAMDI, Khalid A. Sustainable FDM additive manufacturing of ABS components with emphasis on energy minimized and time efficient lightweight construction. **International Journal of Lightweight Materials and Manufacture**, 2019.
- ALMEIDA, H. A.; BÁRTOLO, P. J. S. Virtual topological optimisation of scaffolds for rapid prototyping. **Medical engineering & physics**, v. 32, n. 7, p. 775-782, 2010.
- ASTM D638 –**Standard test method for tensile properties of plastics**, v. 08.01 (2000).
- AHN, S.; KIM, S.; LEE, H.; LEE, J. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. **Rapid prototyping journal**, v. 8, n. 4, p. 248-257, 2002.
- ARORA, J. S. **Introduction to Optimun Design**. 2. ed. San Diego, United States of America: Academic Press, 2004.
- BAK, D. Rapid prototyping or rapid production? 3D printing processes move industry towards the latter. **Assembly Automation**, v. 23, n. 4, p. 340-345, 2003.
- CLAUSEN, A.; AAGE, N; SIGMUND, O. Exploiting additive manufacturing infill in topology optimization for improved buckling load. **Engineering**, v. 2, n. 2, p. 250-257, 2016.
- DAWOUD, M.; TAHA, I.; EBEID, S.J. Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 21, p. 39-45, 2016.
- DESHPANDE, V. S.; FLECK, N. A.; ASHBY, M. F. Effective properties of the octet-truss lattice material. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 49, n. 8, p. 1747-1769, 2001.
- EMMELMANN, C.; SANDER, P.; K., J.; WYCISK, E. Laser additive manufacturing and bionics: redefining lightweight design. **Physics Procedia**, v. 12, p. 364-368, 2011.
- GIBSON, I., STUCKER, B.; ROSEN, D. W. **Additive manufacturing technologies**. New York: Springer, 510p., 2010.
- GRESS, D. R.; KALAFSKY, R. V. **Geographies of production in 3D: Theoretical and research implications stemming from additive manufacturing**. Geoforum, v. 60, p. 43-52, 2015.
- HUTMACHER, D. W.; SCHANTZ, T.; ZEIN I.; WOEL, 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, C. Y. **Método de otimização topológica aplicado ao projeto de sonotrodos para transdutores piezelétricos**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.

KHAJAVI, S. H., PARTANEN, J. e HOLMSTRÖM, J. Additive manufacturing in the spare parts supply chain. **Computers in industry**, v. 65.1, p.50-63, 2014

KLIPPSTEIN, H.; HASSANIN, H.; DIAZ DE CERIO SANCHEZ, A.; ZWEIRI, Y.; SENEVIRATNE, L. Additive manufacturing of porous structures for unmanned aerial vehicles applications. **Advanced Engineering Materials**, 2018.

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.

LEARY, M. MERLI, L., TORTI, F., MAZUR, M., & BRANDT, M. Optimal topology for additive manufacture: A method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. **Materials & Design**, v. 63, p. 678-690, 2014.

LEE, J.; HUANG, A. Fatigue analysis of FDM materials. **Rapid prototyping journal**, v. 19, n. 4, p. 291-299, 2013.

LI, T.; WANG, L. Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials. **Composite Structures**, v. 175, p. 46-57, 2017.

LIU, J. GAYNOR, A. T., CHEN, S., KANG, Z., SURESH, K., TAKEZAWA, A., CHENG, L. Current and future trends in topology optimization for additive manufacturing. **Structural and Multidisciplinary Optimization**, v. 57, n. 6, p. 2457-2483, 2018.

LU, C. et al. Mechanical performance of 3D-printing plastic honeycomb sandwich structure. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, v. 5, n. 1, p. 47-54, 2018.

MAGALHÃES, L. C.; **A Influência dos Parâmetros Construtivos no Comportamento Mecânico de Peças Fabricadas Pela Técnica de Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)**. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PPGEM) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010. 85 p.

MAGALHÃES, L. C.; VOLPATO, N.; LUERSEN, M. A. Evaluation of stiffness and strength in fused deposition sandwich specimens. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 36, n. 3, p. 449-459, 2014.

MOHAMED, O. A.; MASOOD, S. H.; BHOWMIK, J. L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. **Advances in Manufacturing**, v. 3, n. 1, p. 42-53, 2015.

MUELLER, B. Additive manufacturing technologies–Rapid prototyping to direct digital manufacturing. **Assembly Automation**, v. 32, n. 2, 2012.

ONWUBOLU, G. C.; RAYEGANI, F. Characterization and optimization of mechanical properties of ABS parts manufactured by the fused deposition modelling process. **International Journal of Manufacturing Engineering**, v. 2014, 2014.

RADTKE, A. G.; TRABASSO, L. G. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE PEÇAS PROTOTIPADAS. **Anais do XV ENCITA 2009**, ITA, Outubro, 19-22, 2009

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.

RAYEGANI, F.; ONWUBOLU, G. C. Fused deposition modelling (FDM) process parameter prediction and optimization using group method for data handling (GMDH) and differential evolution (DE). **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 1-4, p. 509-519, 2014.

REZAI, R.; BADROSSAMAY, M.; GHAIE, A.; MOOSAVI, H.. Topology optimization for fused deposition modeling process. **Procedia CIRP**, v. 6, p. 521-526, 2013.

SAADLAOUI, Yassine, MILAN, J. L., ROSSI, J. M., & CHABRAND, P.. Topology optimization and additive manufacturing: Comparison of conception methods using industrial codes. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 43, p. 178-186, 2017.

SANT'ANNA, H. M. **Otimização topológica de estruturas bidimensionais contínuas submetidas a restrições de flexibilidade e tensão**. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. 174 p.

STRATASYS. **Termoplásticos FDM**. Disponível em: <http://usglobalimages.stratasys.com/Main/Files/Material_Spec_Sheets/MSS_FDM_ABSplusP430.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2018

VOLPATO, N. Processos de AM por extrusão de material. In: VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. P. 145-175

VOLPATO, N.; DA SILVA, J. V. L. Planejamento de processo para tecnologias de AM. In: VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. P. 97-125

VOLPATO, N.; DA SILVA, J. V. L. Aplicação direta da manufatura aditiva na fabricação final. In: VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. P.325-341

VOLPATO, N.; DE CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3d; In: VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. São Paulo: 2007. P. 1-14

VOLPATO, N.; DE CARVALHO, J. Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D. In: VOLPATO, N. **Manufatura Aditiva – Tecnologias e aplicações da impressão 3D**. São Paulo: Blucher, 2017. P. 15-29

WALTON, D.; MOZTARZADEH, H. Design and development of an additive manufactured component by topology optimisation. **Procedia CIRP**, v. 60, p. 205-210, 2017.

ZHU, J.; ZHANG, W.; XIA, L. Topology optimization in aircraft and aerospace structures design. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 23, n. 4, p. 595-622, 2016.