



**COMPARAÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA ENTRE MODELOS GERADOS POR OTIMIZAÇÃO
TOPOLÓGICA E TIPOS DE PREENCHIMENTO PARA REDUÇÃO DA MASSA EM PEÇAS IMPRESSAS**

FELIPE YUKIO MIYASAKI STEIN

**DISSERTAÇÃO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

OUTUBRO DE 2024



**COMPARAÇÃO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA ENTRE MODELOS GERADOS POR OTIMIZAÇÃO
TOPOLÓGICA E TIPOS DE PREENCHIMENTO PARA REDUÇÃO DA MASSA EM PEÇAS IMPRESSAS**

FELIPE YUKIO MIYASAKI STEIN

**DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA E GESTÃO DO
INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

ORIENTADORES DO INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA:

PROF. DR. JOÃO DA ROCHA E SILVA

ORIENTADORES DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ:

PROFA. DRA. MÁRCIA SILVA DE ARAÚJO

OUTUBRO DE 2024

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho a:

Meus pais, pelo amor incondicional, por todo o suporte e apoio durante todos esses anos de formação e por acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que duvidei de minha capacidade. Vocês são meu exemplo e não teria chegado até aqui sem seu apoio.

Meus amigos, tanto os que estiveram comigo por todo o caminho, quanto os que foram buscar novas perspectivas de vida, por todo o companheirismo, risadas, conselhos e incentivo.

Todos meus professores, que sempre se esforçaram para transmitir seu conhecimento da melhor maneira para que me tornasse o melhor profissional possível.

Agradeço muito a todos!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus orientadores, Prof Dr João da Rocha e Silva, pelo suporte e orientação durante o presente trabalho e Profa Dra Márcia Silva de Araújo pela orientação e suporte nesse trabalho e pela oportunidade que tive durante o período dentro da universidade de aprender e trabalhar em seu laboratório.

Agradeço ao Prof Me Jorge Henrique de Carvalho Santos por permitir trabalhar no laboratório para que aplicasse mais meu conhecimento prático e pelo auxílio na obtenção de documentos a respeito dos materiais utilizados.

Agradeço também a Engenheira Luiza Maria da Silva Barreira por permitir a realização dos ensaios de compressão em seu laboratório, assim como o auxílio na exportação dos dados registrados no programa.

Agradeço ao Nickolas Giacomitti pelo auxílio nos ensaios de compressão e auxílio nas impressões.

RESUMO

Palavras-chave: Manufatura aditiva, Otimização topológica, Impressão 3D e Preenchimento.

Este estudo investiga a resistência mecânica de peças impressas em 3D com diferentes padrões de preenchimento e com estrutura otimizada topologicamente, visando redução de massa. A manufatura aditiva, especialmente por FDM (Modelagem por Fusão e Deposição), vem ganhando relevância em setores industriais e residenciais, permitindo a produção de peças complexas e funcionais. O trabalho compara amostras impressas em padrões convencionais (grid e triangular) e otimizações topológicas, realizadas no software SolidWorks. Foram avaliadas diversas configurações de malha e simetria, além da influência de uma parede externa na resistência mecânica das peças. Os ensaios de compressão revelaram todas as amostras superaram a carga de 2kN para as quais foram dimensionadas. Também mostrou que os preenchimentos convencionais superaram os otimizados em até 61,9%, sugerindo que a distribuição não uniforme de massa nos modelos otimizados impacta negativamente a capacidade de carga. Amostras com parede externa, especialmente no padrão grid com uma única parede, demonstraram maior resistência devido à amarração estrutural superando em 11,9% a amostra grid sem a presença de parede. Todas as amostras apresentaram um comportamento de fratura frágil, sendo a otimizada com parede mantida a única na qual se observou uma pequena deformação plástica. Por fim foi realizada uma análise de variância (ANOVA), que confirmou diferenças estatisticamente significativas entre as amostras exceto nas comparações entre as otimizadas topologicamente sem parede e uma única parede e o padrão grid e triangular com parede.

ABSTRACT

Keywords: Additive manufacturing, Topological optimization, 3D printing and Infill.

This study investigates the mechanical strength of 3D printed parts with different filling patterns and a topologically optimized structure, with the aim of reducing mass. Additive manufacturing, especially FDM (Fusion Deposition Modeling), has been gaining relevance in industrial and residential sectors, enabling the production of complex and functional parts. The work compares samples printed in conventional patterns (grid and triangular) and topological optimizations made in SolidWorks software. Various mesh and symmetry configurations were evaluated, as well as the influence of an external wall on the mechanical strength of the parts. The compression tests showed that all the samples exceeded the 2kN load for which they were designed. It also showed that the conventional fillings exceeded the optimized ones by up to 61.9%, suggesting that the non-uniform distribution of mass in the optimized models negatively impacts the load capacity. Samples with an external wall, especially in the grid pattern with a single wall, showed greater resistance due to structural binding, outperforming the grid sample without a wall by 11.9%. All the samples showed brittle fracture behaviour, with the optimized one with a maintained wall being the only one in which a small plastic deformation was observed. Finally, an analysis of variance (ANOVA) was carried out, which confirmed statistically significant differences between the samples except in the comparisons between the topologically optimized ones without a wall and a single wall and the grid and triangular pattern with a wall.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 Pistão de Porsche 911 GT2 impresso (Porsche, 2023)	4
Figura 2 Pinça Bugatti Chiron Impressa em 3D (Bugatti, 2018)	4
Figura 3 Passo a passo de fabricação de peça por manufatura aditiva	5
Figura 4 Fatiamento de peça com 0,1 mm de espessura de camada	6
Figura 5 Fatiamento de peça com 0,3 mm de espessura de camada	7
Figura 6 : Padrão grid, triangular e honeycomb (Simmons, 2024) Adaptado	8
Figura 7 Orientação de construção (Feng, Wang, & Wei, 2019)	8
Figura 8 Redistribuição de massa na otimização topológica (Dassault SolidWorks, 2018)	10
Figura 9 a) Corpo de prova cilíndrico para ensaio de compressão. (b) Resultado do ensaio em materiais frágeis. (c) Resultado do ensaio em materiais dúcteis. (Garcia, Spim, & Santos, 2012)	12
Figura 10 Fluxograma de trabalho parte 1	13
Figura 11 Fluxograma de trabalho parte 2	14
Figura 12 Dimensões dos Provetes	15
Figura 13 Modelos em 3D no SolidWorks	15
Figura 14 Comparativo entre malha grosseira e malha fina	16
Figura 15 Interface de otimização topológica no SolidWorks	17
Figura 16 Planos de simetria	18
Figura 17 Mesclagem de arquivos com uso do meshmixer	19
Figura 18 Corpo de prova otimizado topologicamente com uma parede	19
Figura 19 Teste de massa dos provetes com preenchimento padrão	20
Figura 20 Padrão grid	21
Figura 21 Padrão grid com parede	21
Figura 22 Padrão triangular	21
Figura 23 Padrão triangular com parede	21
Figura 24 Impressora Anycubic Kobra 2 Neo	22
Figura 25 Máquina universal de ensaios da Shimadzu	22
Figura 26 Marcação do centro do prato de compressão	23
Figura 27 Otimização topológica sem simetria	25
Figura 28 Otimização topológica com simetria de meio	26

Figura 29 Otimização topológica com simetria de um quarto.....	26
Figura 30 Modelo final otimizado topologicamente.	27
Figura 31 Modelo com parede externa preservada.....	27
Figura 32 Vista de corte do modelo com parede preservada	28
Figura 33 Simulação grid com parede.....	29
Figura 34 Simulação grid	29
Figura 35 Simulação triangular com parede.....	29
Figura 36 Simulação triangular.....	29
Figura 37 Impressão dos provetes	30
Figura 38 Comparação dos resultados obtidos por ensaio de compressão.....	32
Figura 39 Corpos de prova após a falha	35

LISTA DE TABELA

Tabela 1 Propriedades e características do material e condições de processo	17
Tabela 2 Tensões de Von Mises (Simulado).....	28
Tabela 3 Tensão limite de escoamento de cada variação	31
Tabela 4 Grid X Triangular	36
Tabela 5 Grid com parede X Triangular com parede	36
Tabela 6 Grid X Grid com parede.....	37
Tabela 7 Triangular X Triangular com parede	37
Tabela 8 Grid X Otimizado topologicamente com parede mantida	37
Tabela 9 Grid com parede X Otimizado topologicamente com uma parede	37
Tabela 10 Otimizado topologicamente X Otimizado topologicamente com parede mantida	38
Tabela 11 Otimizado topologicamente X Otimizado topologicamente com uma parede	38
Tabela 12 Grid X Triangular com parede	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	Desenho Assistido por Computador
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FDM	Modelagem por Fusão e Deposição
FEA	Análise de Elementos Finitos
IPB	Instituto Politécnico de Bragança
LERM	Laboratório de Engenharia de Resistência dos Materiais
MEX	Extrusão de material
SIMP	Solid Isotropic Material with Penalization
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	Linguagem de mosaico de estereolitografia
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Caracterização da oportunidade	1
1.3 Objetivos	1
1.4 Justificativa	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Manufatura aditiva	3
2.1.1 Manufatura aditiva por extrusão de material (MEX):	5
2.1.2 Parâmetros da manufatura aditiva MEX.....	6
2.1.2.1 Altura de camada.....	6
2.1.2.2 Preenchimento.....	7
2.1.2.3 Temperatura do bico.....	8
2.1.2.4 Orientação de construção.....	8
2.1.2.5 Espessura da parede.....	9
2.2 Otimização topológica.....	9
2.3 Ensaio de compressão.....	11
3 MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1 Modelagem	14
3.2 Otimização topológica.....	15
3.2.1 Definição da malha	16
3.2.2 Definição dos esforços e superfície fixa	16
3.2.3 Definição do material	17
3.2.4 Definição da simetria	18
3.2.5 Tratamento após otimizado	18
3.3 Fatiamento.....	19

3.4 Simulação	20
3.5 Impressão 3D	21
3.6 Ensaio de compressão	22
3.7 Análise estatística.....	23
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 Definição da malha do modelo	25
4.2 Simulações	28
4.3 Impressão 3D	29
4.4 Ensaio de compressão	30
4.5 Análise de variância - ANOVA	36
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS.....	41

1. INTRODUÇÃO

A fabricação por manufatura aditiva vem se popularizando nos últimos anos, tornando-se cada vez mais presente nas empresas para a realização de protótipos e também presente em residências as quais podem realizar a fabricação de múltiplos objetos, tanto para decoração quanto para a realização de alguma manutenção.

1.1 Contextualização

Atualmente existem diversos programas como o Ultimaker Cura, Repetier, Simplify, entre outros, que realizam a conversão de objetos modelados em 3D para o linguagem de comando numérico, códigos lidos por impressoras 3D, para a fabricação dos objetos. Porém apesar de existirem vários programas capazes de fazer essa conversão, todos utilizam o mesmo princípio de gerar objetos preenchidos através do preenchimento com diferentes padrões, sem nenhum tipo de análise da aplicação do objeto dentro do *software*. A otimização topológica é um método que usa a análise de elementos finitos para a redução de massa nas peças (Dassault SolidWorks, 2018). Esse método vem sendo muito utilizado na indústria automobilística, principalmente em carros de alto desempenho (Porsche, 2023). Por conta disso, com o objetivo de uma melhor análise dos modelos antes da impressão, o presente trabalho buscou substituir o preenchimento padrão por um preenchimento otimizado topologicamente.

1.2 Caracterização da oportunidade

A manufatura aditiva vem sendo cada vez mais utilizada na indústria, tanto para a realização de protótipos quanto para a geração de peças comerciais, destinadas a um produto final (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015) (Deckard & Beaman, 1988). A utilização de uma técnica como a otimização topológica, pode trazer benefícios às peças impressas, com uma melhor relação entre a resistência mecânica e a massa. Portanto por meio desse estudo será possível entender melhor como o programa funciona e quais as suas limitações.

1.3 Objetivos

O objetivo geral é a comparação de resistência à compressão de provetes impressos em 3D com preenchimento padrão e com preenchimento realizado por otimização topológica.

Os objetivos específicos são:

- Entender a influência das variações de condições de contorno, como malha e simetria na otimização topológica
- Analisar o efeito da parede externa
- Verificar os tipos de fratura conforme a geometria

1.4 Justificativa

O estudo pretende usar uma ferramenta para desenvolvimento de produtos ainda em aperfeiçoamento, a otimização topológica, assim como uma nova forma de fabricação, a impressão 3D. A união de ambas pode ser muito benéfica, pois a otimização não é mais limitada ao método de fabricação, possibilitando um resultado mais eficiente. Assim, o estudo se justifica por permitir melhor conhecer o desempenho e compreender as limitações das ferramentas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, serão apresentados os principais conceitos necessários para o entendimento do trabalho realizado. Serão abordadas informações sobre a manufatura aditiva, e os princípios de otimização topológica aplicados no projeto dos corpos de prova.

2.1 Manufatura aditiva

De acordo com (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015), a manufatura é um termo mais formal utilizado para representar o que é popularmente conhecido como impressão 3D. Há pouco tempo a manufatura aditiva era conhecida como prototipagem rápida, que é um termo muito utilizado em diversas indústrias para o processo de criação de um modelo prévio de alguma peça ou produto, ou seja, um protótipo, que serve como base para avaliação do projeto antes de seu lançamento de forma comercial e produção em larga escala. Atualmente, engenheiros de *software* e modeladores de negócios usam a prototipagem rápida para apresentar uma prévia aos seus clientes e times de projeto, para verificar se seus produtos estão correspondendo às expectativas. E, assim, também receber um *feedback* a respeito do trabalho até então realizado, possibilitando a correção do projeto e acrescentando possíveis melhorias. Numa visão geral, o termo prototipagem rápida pode ser utilizado tanto para protótipos físicos, que geralmente são fabricados em impressoras 3D, quanto para protótipos digitais, como uma interface de programa ou aplicativo (Alves, Braga, Simão, Neto, & Duarte, 2001).

Conforme os autores ressaltam (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015), nos dias atuais, com o avanço da tecnologia de manufatura aditiva, o termo prototipagem rápida não abrange mais as aplicações da mesma, pois já deixou de ser utilizada apenas para a realização de protótipos em estágios iniciais, sendo agora utilizada em peças para produto final, como as pinças de freio da Bugatti Chiron e os pistões da Porsche 911 GT2 vistas na Figura 1 e Figura 2.



Figura 1 Pistão de Porsche 911 GT2 impresso (Porsche, 2023)



Figura 2 Pinça Bugatti Chiron Impressa em 3D (Bugatti, 2018)

Como dito anteriormente a manufatura aditiva vem sendo utilizada para a fabricação do produto final, sendo uma das suas principais vantagens a possibilidade da realização de geometrias mais complexas, que por vezes não poderia ser realizada por processos de fabricação convencionais como o uso de usinagem CNC (comando numérico computadorizado), fundição, conformação, injeção, entre outros. Essa possibilidade acaba por facilitar o trabalho durante a etapa de projeto, por ser uma preocupação a menos no momento da realização do modelo 3D (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015) e (Linke, 2017).

O processo de fabricação por manufatura aditiva, consiste basicamente na adição de material em camadas, sendo que quanto mais fina for a camada, mais próximo do modelo virtual o objeto físico será. Para a maior parte dos processos de manufatura aditiva, pode-se seguir o seguinte passo a passo: Modelagem 3D com um software de CAD; transformação do modelo 3D em formato STL; fatiamento do objeto em 3D para a geração do código de fabricação, por exemplo a linguagem de comando numérico; *set up* da máquina; remoção e pós processamento, processo similar ao mostrado na Figura 3. (Gibson, Rosen, & Stucker, 2015).

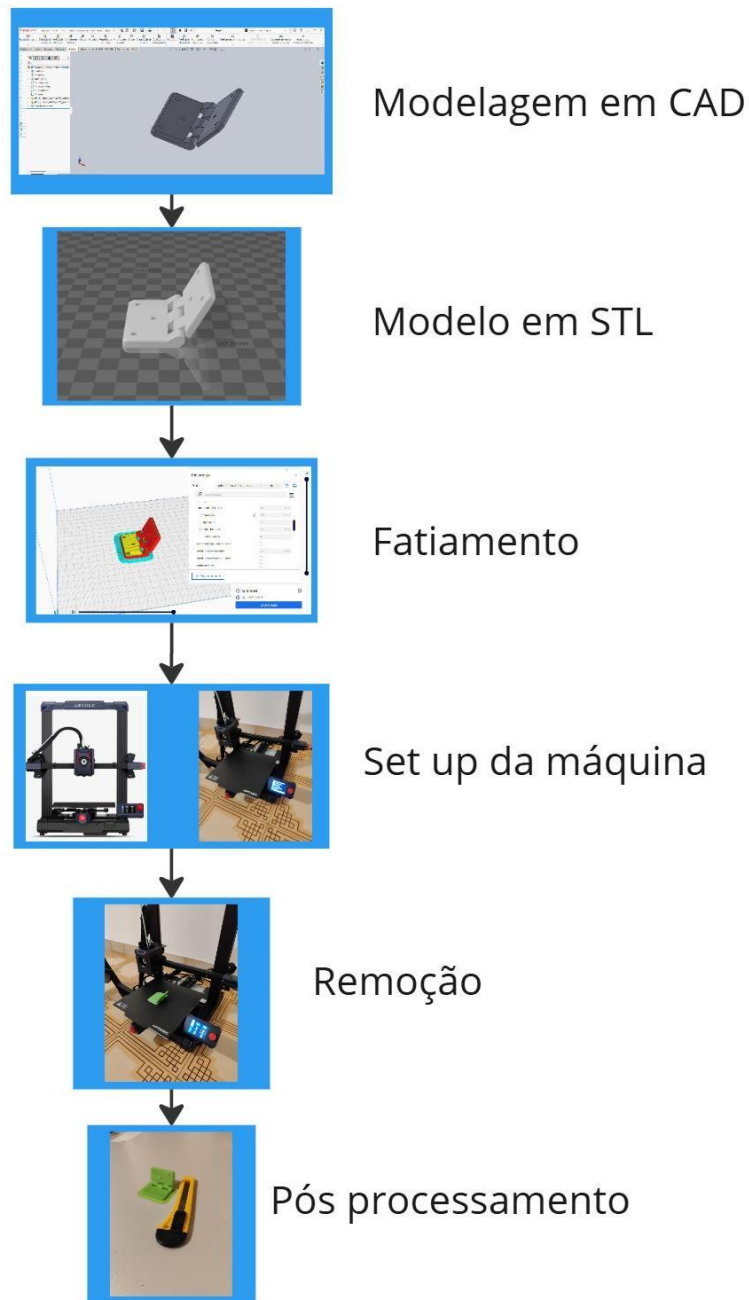


Figura 3 Passo a passo de fabricação de peça por manufatura aditiva

2.1.1 Manufatura aditiva por extrusão de material (MEX) (Standard, 2015):

A impressão 3D por extrusão de material, também conhecido por FDM (*fused deposition modeling*) mais especificamente para polímeros, é um dos meios mais populares de manufatura aditiva e por conta dos avanços tecnológicos se tornou um processo que possui um baixo custo, quando comparado com outros métodos de

impressão. A facilidade de operação com a grande variedade de *softwares* voltados a impressão por MEX e a popularização de modelos 3D compartilhados em *sites* na *internet*, fez com que se tornasse muito popular entre pequenas e grandes empresas, hobbystas, *designers* e entusiastas, apesar de não produzir peças tão resistentes quanto os métodos SLS (*selective laser sintering*) e SLM (*selective laser melting*), que possibilitam a impressão de peças metálicas (Huang, Liu, Mokasdar, & Hou, 2013), (Deckard & Beaman, 1988) (Molenaar & Ingeassia, 2024).

2.1.2 Parâmetros da manufatura aditiva MEX

Os parâmetros de impressão tem uma influência direta na qualidade superficial e na resistência mecânica das peças impressas, sendo os parâmetros principais: a altura de camada, temperatura de extrusão a orientação de construção, densidade de preenchimento, padrão de preenchimento e o número de camadas externas. (Rajan, et al., 2022), (Dey & Yodo, 2019), (Solomon, Sevel, & Gunasekaran, 2021)

2.1.2.1 Altura de camada

A altura de camada tem uma influência direta na qualidade e velocidade da impressão, sendo que, quanto maior a altura da camada mais rápida a impressão, porém pior sua qualidade superficial e menor a adesão entre as camadas, enquanto quanto menor a altura de camada, melhor a qualidade superficial e a adesão entre as camadas, porém mais demorado será o processo de impressão, como pode ser visto na Figura 4 e Figura 5. Para que seja possível a realização da impressão, a altura da camada deve sempre ser menor do que o diâmetro do bico da extrusora. (Dey & Yodo, 2019) (Solomon, Sevel, & Gunasekaran, 2021).

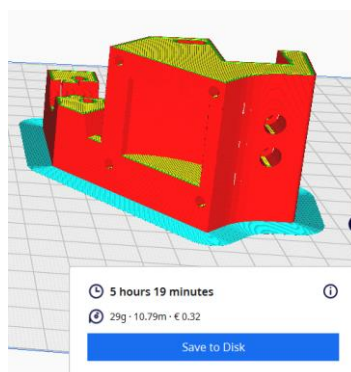


Figura 4 Fatiamento de peça com 0,1 mm de espessura de camada

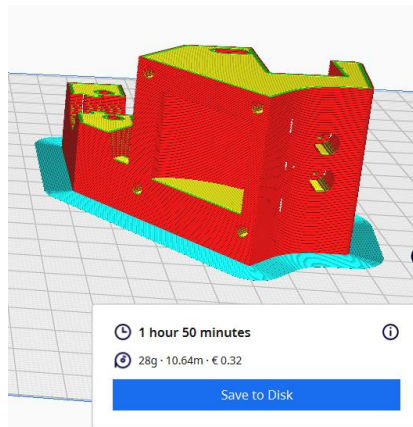


Figura 5 Fatiamento de peça com 0,3 mm de espessura de camada

2.1.2.2 Preenchimento

O preenchimento possui uma influência direta nas propriedades mecânicas dos componentes impressos em 3D, no aspecto da densidade de preenchimento, quanto maior a densidade, maior a resistência mecânica do componente, porém maior será a quantidade de material gasto na impressão e, por consequência, maior o tempo necessário para a realização da impressão e vice versa (Dey & Yodo, 2019), (Solomon, Sevel, & Gunasekaran, 2021), (Ntintakis & Stravroulakis, 2022).

O padrão de preenchimento define a geometria interna da peça impressa, interferindo diretamente no comportamento mecânico do objeto. Existem diversos tipos de preenchimento para se selecionar: *grid*, triangular, *honeycomb* tri-hexagonal, linhas, cruz, cúbico, entre outros. Os padrões de preenchimento mais utilizados, presentes na Figura 6, são o padrão *grid*, que basicamente gera um padrão de malha quadrada, semelhante a uma grelha; o padrão triangular, que gera uma malha treliçada; e o hexagonal, que gera uma malha com padrão hexagonal na peça, semelhante a estrutura de favos de mel. A escolha do tipo de preenchimento varia com a aplicação da peça, pois cada um dá uma característica à peça, por exemplo um padrão pode prover uma boa resistência a tração ou compressão, mas não possui boas características para flexão (Dey & Yodo, 2019), (Solomon, Sevel, & Gunasekaran, 2021), (Ntintakis & Stravroulakis, 2022) .

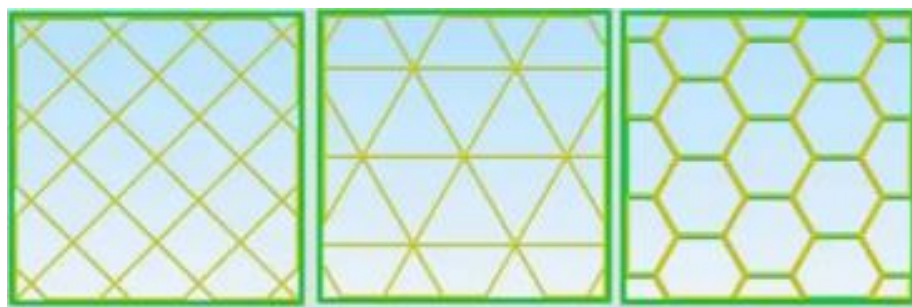


Figura 6 : Padrão grid, triangular e honeycomb (Simmons, 2024) Adaptado

2.1.2.3 Temperatura do bico

A temperatura do bico depende muito do material que está sendo utilizado para a impressão da peça, num geral a temperatura altera a viscosidade do material, sendo recomendado pelo fabricante do material uma faixa de temperatura na qual o mesmo deve ser impresso, evitando que o material possua fluidez demais ou de menos, mantendo suas características mecânicas e haja uma boa adesão entre camadas (Dey & Yodo, 2019) (Solomon, Sevel, & Gunasekaran, 2021).

2.1.2.4 Orientação de construção

A orientação de construção descreve, basicamente, a maneira como o modelo a ser impresso está posicionado na mesa de construção, como observado na Figura 7. Essa orientação afeta a resistência mecânica dos objetos, no estudo mostrado por K. M. Ashtankar (Ashtankar, Kuthe, & Rathour, 2014) a orientação correta no momento da construção, demonstrou uma melhoria de 23,68% em ensaios de tração e 16,65% em ensaios de compressão (Solomon, Sevel, & Gunasekaran, 2021), (Ashtankar, Kuthe, & Rathour, 2014), (Feng, Wang, & Wei, 2019).

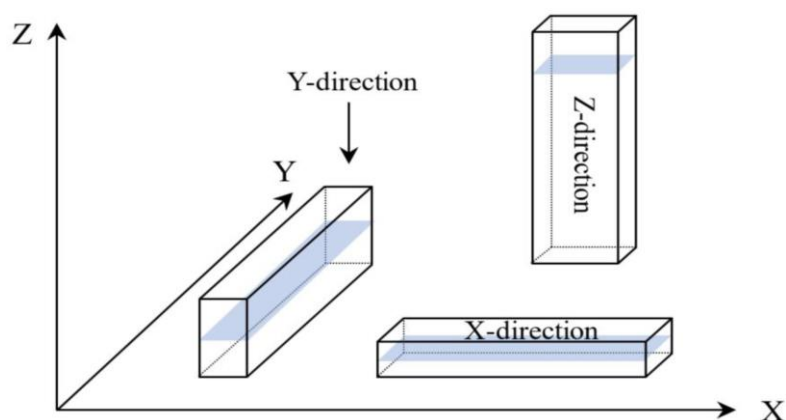


Figura 7 Orientação de construção (Feng, Wang, & Wei, 2019)

2.1.2.5 Espessura da parede

A parede das peças impressas tem efeito tanto na resistência mecânica quanto na resistência térmica dos materiais sendo a segunda mais significativa nos polímeros que possuem baixa condutividade (Ahmad, et al., 2023). No estudo conduzido por (Mazlan, Anas, Izmin, & Abdullah, 2023) a espessura da parede apresentou uma influência muito maior do que a variação de densidade de preenchimento, tanto nas simulações quanto nos ensaios, mostrando a sua importância em peças impressas.

2.2 Otimização topológica

A otimização topológica é um método que utiliza a análise de elementos finitos para otimizar a peça de forma a satisfazer alguma meta determinada, como: encontrar a melhor relação entre massa e rigidez, minimizar massa ou deslocamento, sempre levando em consideração as cargas atuantes e as limitações da geometria, inclusive as restrições de fabricação (Dassault SolidWorks, 2018) (Folger, 2015).

Softwares como o SolidWorks utilizam um algoritmo iterativo para realizar um loop de otimização, buscando gerar a melhor geometria possível, para as condições de contorno determinadas. O *loop* do algoritmo consiste basicamente em utilizar a análise de elementos finitos feitas dentro do *software* para redistribuir o material dentro da peça, como visto na Figura 8, buscando atender todos os requisitos, mecânicos, estruturais e de geometria (Dassault SolidWorks, 2018).

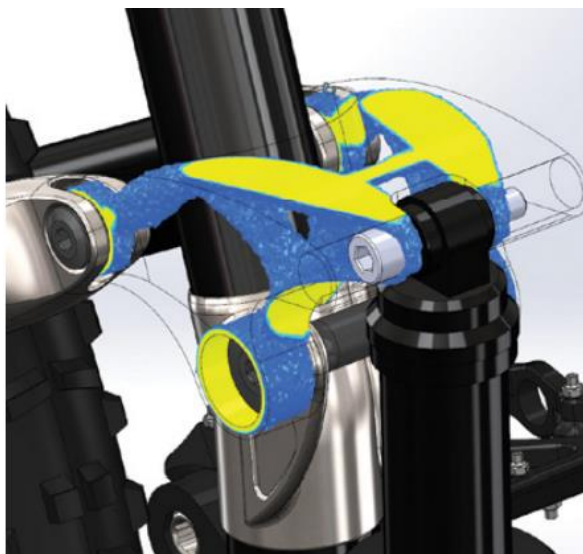


Figura 8 Redistribuição de massa na otimização topológica (Dassault SolidWorks, 2018)

Normalmente a otimização dos componentes ocorre a partir de um componente anterior, sendo realizado com o auxílio de *softwares* de CAD, mas com a otimização topológica os projetistas são capazes de realizar a diminuição de massa das mesmas, com maior facilidade e precisão, gastando menos tempo para obter peças mais leves e resistentes, economizando em quantidade de material e tempo simultaneamente (Dassault SolidWorks, 2018), (Folger, 2015).

O Solidworks utiliza o método *Solid Isotropic Material with Penalization* (SIMP) para a realização da otimização topológica, o qual é capaz de prever a melhor distribuição de material dentro da peça, levando em consideração as restrições e condições de contorno determinadas (Dassault SolidWorks, 2019). De acordo com o método SIMP a relação entre o fator de densidade relativa do material ρ_e , e o módulo de Young de elasticidade do modelo de material isotrópico atribuído E_0 é dada por:

$$E(\rho_e) = \rho_e^p * E_0 \text{ (Dassault SolidWorks, 2019)}$$

No qual p é o fator de penalidade, que diminui a contribuição de elementos com densidades intermediárias na rigidez, sendo geralmente utilizado $p=3$. Também de acordo com esse método a rigidez global é modulada de acordo com:

$$KSIMP = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min}) * \rho_e^p] * K_e \text{ (Dassault SolidWorks, 2019)}$$

Sendo Ke é a matriz de rigidez do elemento, N é o número de elementos, ρ_{min} é a densidade mínima, ρ a densidade do elemento e p o fator de penalização (Dassault SolidWorks, 2019).

Já durante as iterações de otimização, as restrições funcionais e de massa e o equilíbrio de força-rigidez devem ser atendidos, através da seguinte fórmula:

$$\sum_{e=1}^N \{v_e\}^T * \rho_e \leq M \text{ (Dassault SolidWorks, 2019)}$$

Onde M o alvo de massa a ser atingido e v_e elemento de o volume (Dassault SolidWorks, 2019).

Com o avanço da tecnologia de manufatura aditiva, a otimização pode ser cada vez mais explorada, reduzindo as restrições de fabricação que eram geradas por outros meios de fabricação. Muitos dos softwares usados para a otimização já exportam o modelo otimizado em STL, formato muito utilizado para realizar o fatiamento de impressão 3D (Dassault SolidWorks, 2018), (Folger, 2015)

2.3 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão possui relações de tensão muito similares aos observados no ensaio de tração. Existem diversas aplicações práticas para os ensaios de compressão, sendo mais observados na engenharia civil, com materiais como o concreto e a madeira. Na maioria das vezes o ensaio de compressão é realizado em materiais frágeis como cerâmicos, ferros fundidos, madeira, entre outros, nesses casos a fratura se dá a 45° do eixo de aplicação da carga, como pode ser observado no item b da Figura 9. Já materiais dúcteis, como metais, ocorre o embarrilamento do corpo de prova, como pode ser observado no item c da Figura 9 (Garcia, Spim, & Santos, 2012).

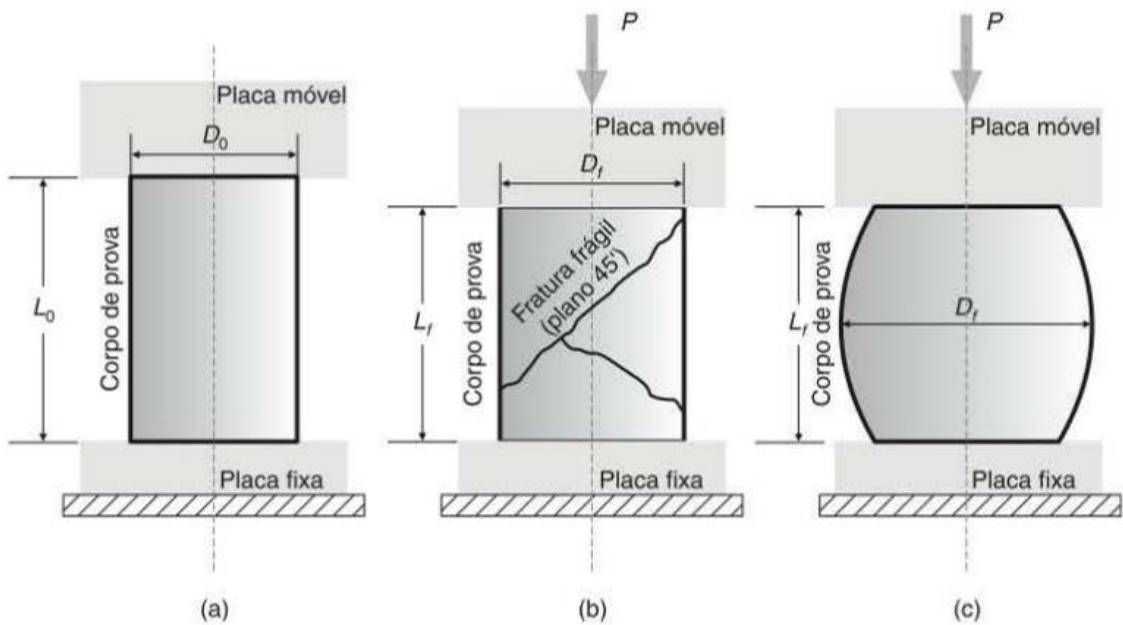


Figura 9 a) Corpo de prova cilíndrico para ensaio de compressão. (b) Resultado do ensaio em materiais frágeis. (c) Resultado do ensaio em materiais dúcteis. (Garcia, Spim, & Santos, 2012)

De forma geral as tensões e deformações obtidas no ensaio podem ser determinadas da seguinte forma (Garcia, Spim, & Santos, 2012):

Tensão convencional:

$$\sigma_c = \frac{P}{S_0} = \frac{4 * P}{\pi * D_0^2}$$

Na qual σ_c é a tensão convencional, S_0 é a área inicial da secção transversal, D_0 é o diâmetro inicial e P é a força aplicada.

Deformação convencional:

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \rightarrow \frac{L}{L_0} = \varepsilon_c + 1$$

Em que L é o comprimento real da amostra, L_0 é o comprimento inicial e ε_c é a deformação convencional

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão abordados os métodos utilizados em cada etapa, para a realização do estudo da otimização topológica como alternativa de estrutura na impressão 3D. A primeira etapa foi o projeto dos provetes conforme a norma ASTM 695-15 (ASTM, 2015), então foram definidas as condições de contorno, depois foi realizada a análise dos resultados da otimização e selecionados os corpos para a impressão, então realizou-se o fatiamento dos modelos otimizados e verificou-se a massa dos mesmos, para o fatiamento dos modelos em padrão triangular e grid, com a mesma massa, por fim foi realizada a impressão, o ensaio de compressão e a análise dos resultados, processo similar ao mostrado nas Figura 10 e 11.

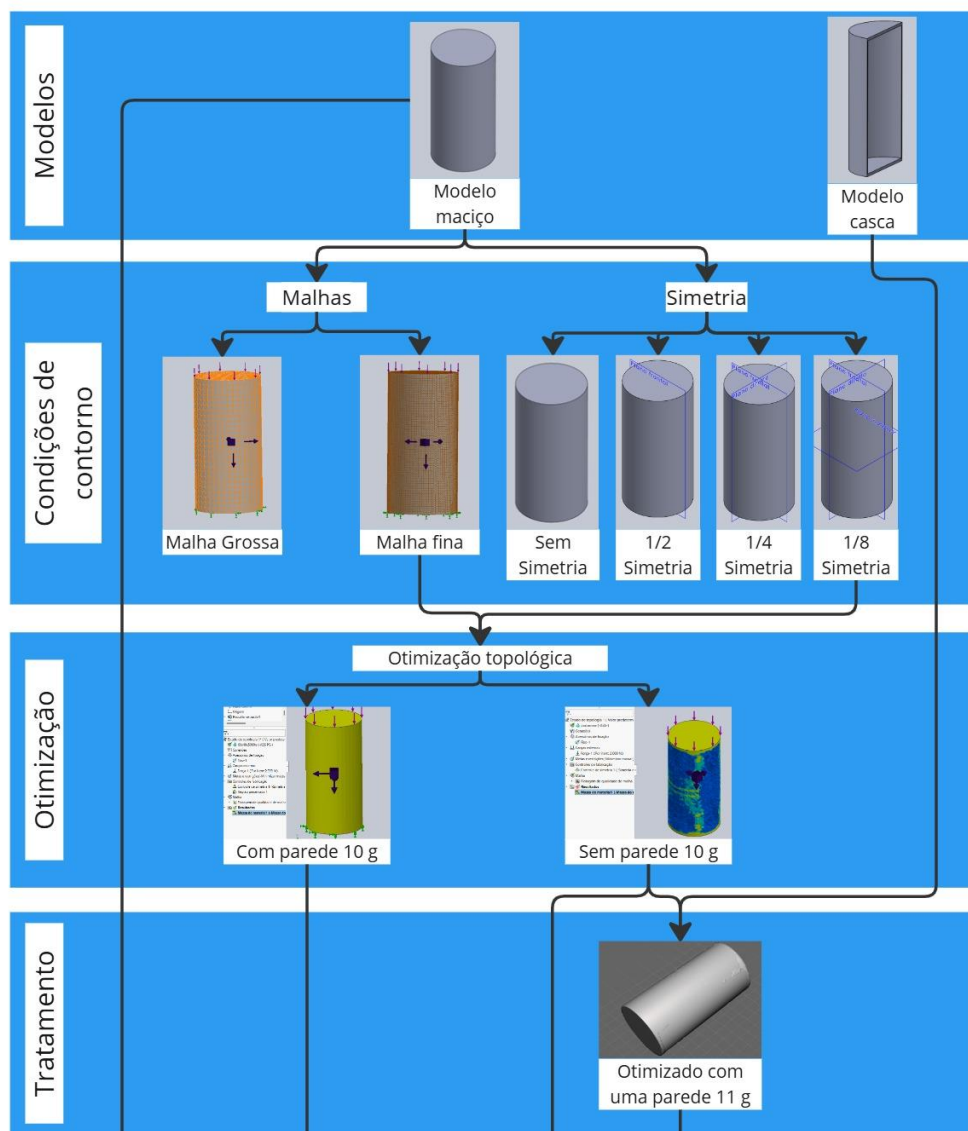


Figura 10 Fluxograma de trabalho parte 1

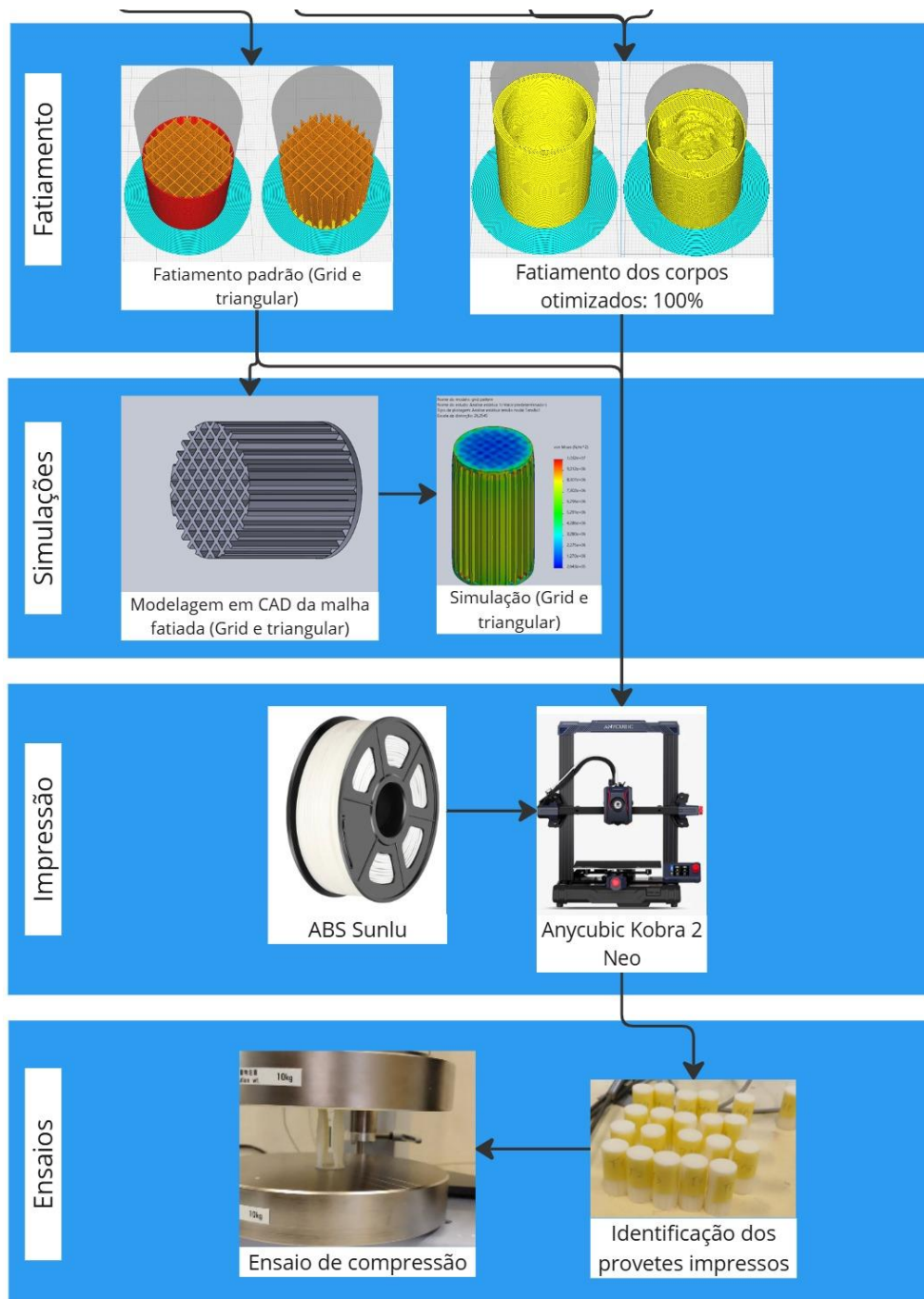


Figura 11 Fluxograma de trabalho parte 2

3.1 Modelagem

Os modelos foram dimensionados com base na otimização topológica dos corpos de prova padronizados, adotando-se o dobro das dimensões recomendadas pela norma ASTM 695-15 (ASTM, 2015) conforme visto na Figura 12. O primeiro modelo, que serviu como base para as otimizações e fatiamentos padrão, foi feito de

forma maciça, enquanto o segundo modelo, que serviu como uma casca externa, foi feito com a espessura de uma parede, ou seja 0,4 mm (Figura 13).

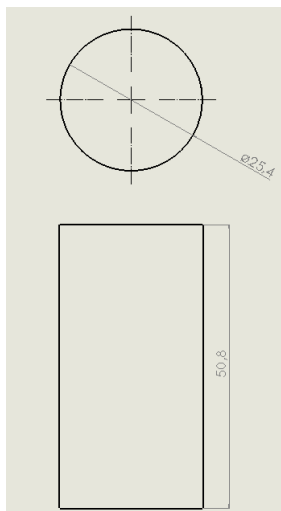


Figura 12 Dimensões dos Provetes

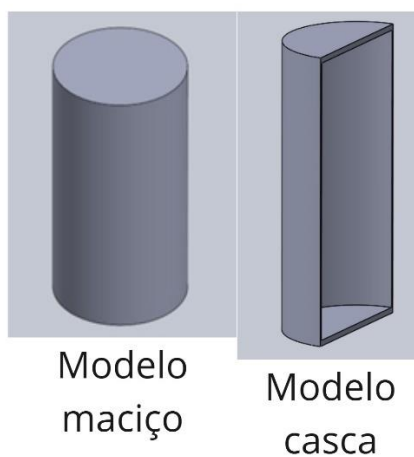


Figura 13 Modelos em 3D no SolidWorks

3.2 Otimização topológica

A otimização topológica foi conduzida no *software* SolidWorks, no qual os parâmetros de restrição foram variados para analisar diferentes configurações e suas respectivas influências nas propriedades mecânicas dos corpos de prova. A otimização permitiu identificar padrões que equilibram redução de massa e desempenho estrutural.

3.2.1 Definição da malha

Inicialmente, foi definida uma malha baseada na curvatura do corpo de prova. No entanto, devido à limitação do *software* em gerar essa malha, optou-se pela utilização de uma malha padrão. A configuração inicial contou com uma malha tetraédrica com elementos de 2 mm, resultando em 18.615 elementos e 3.758 nós. Após a primeira análise, foi realizado um refino da malha, reduzindo o tamanho dos elementos para 0,5 mm, o que gerou 591.107 elementos e 108.256 nós, proporcionando maior precisão nos resultados da análise, sendo essa a utilizada para as otimizações. Cada nó presente na superfície do modelo possui 6 graus de liberdade enquanto os nós que estão no interior do mesmo possuem 3 graus de liberdade. (Kurowski, 2015) A comparação das malhas pode ser observada na Figura 14.

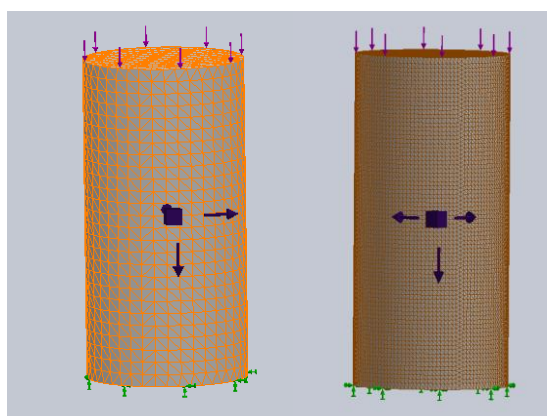


Figura 14 Comparativo entre malha grosseira e malha fina

3.2.2 Definição dos esforços e superfície fixa

Para a realização dos provetes otimizados a carga aplicada foi estabelecida em 2 kN, atuando sobre a face superior do provete, enquanto a face inferior foi considerada como superfície fixa como observado na Figura 15. Adicionalmente, foi estipulado que a face externa do corpo deveria ser preservada, que o deslocamento sob compressão não excedesse 10 mm, e que fosse alcançada uma redução de massa de 50%.

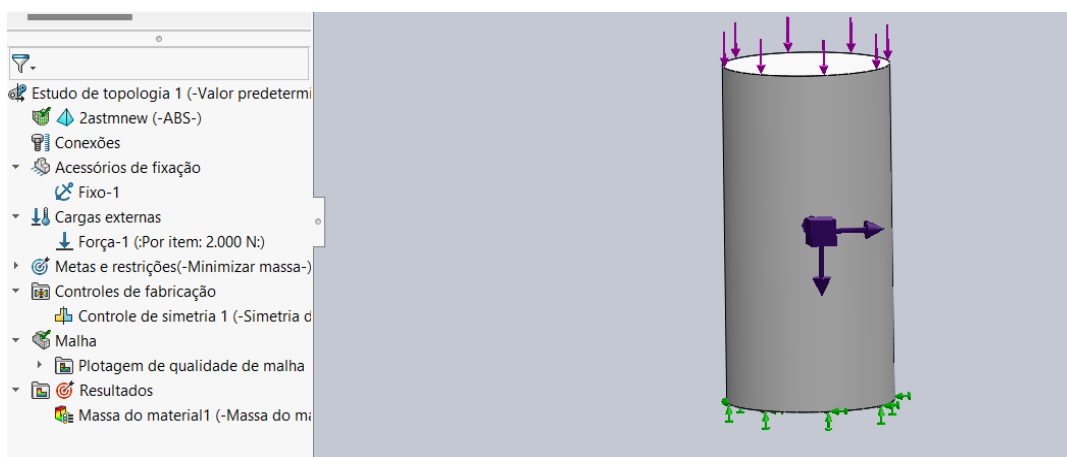


Figura 15 Interface de otimização topológica no SolidWorks

3.2.3 Definição do material

O material selecionado para a fabricação dos provetes foi o ABS da marca Sunlu. De acordo com as especificações fornecidas pela fabricante, o material apresenta uma deformação de 22% no ponto de ruptura e uma tensão máxima de 43 MPa. As propriedades mencionadas foram extraídas do *data sheet* do material, disponível no *site* da fabricante, conforme apresentadas na Tabela 1. Essas informações foram incluídas nas especificações do material escolhido para a otimização e simulação do Solidworks.

Tabela 1 Propriedades e características do material e condições de processo (Sunlu, 2021)

Tensão Máxima (MPa)	43
Deformação até a ruptura	22%
Densidade (g/cm)	1,04
Cor	ABS Natural
Temperatura do bico (°C)	230-270
Temperatura da mesa (°C)	90-110
Diâmetro do filamento (mm)	1,75

3.2.4 Definição da simetria

Para a realização do estudo de otimização topológica, foi analisada a variação dos planos de simetria, os quais forçam a otimização topológica a distribuir a massa em relação ao plano selecionado, sendo realizado com os seguintes parâmetros: sem plano de simetria; meia simetria (plano frontal); um quarto de simetria (plano frontal e direito); e um oitavo de simetria (planos frontal, direito e superior) como ilustrado na Figura 16.

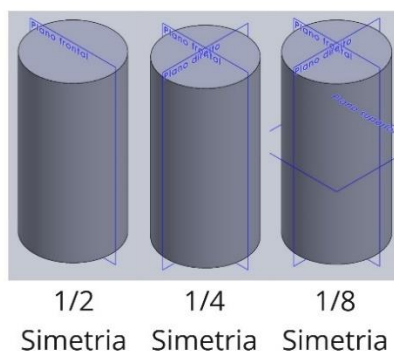


Figura 16 Planos de simetria

3.2.5 Tratamento após otimizado

Após a criação do modelo otimizado sem parede externa, foi gerado o modelo casca externa com 0,4 mm de espessura, o que representa uma única camada, com o objetivo de avaliar a influência dessa parede na resistência mecânica de peças impressas. Essa modificação foi realizada utilizando o *software* Meshmixer, que permite inserir dois modelos 3D com arquivo formato STL e gerar um novo objeto resultante da combinação dos dois modelos, conforme ilustrado na Figura 17 e Figura 18.

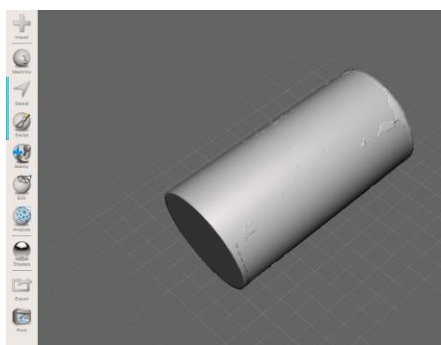


Figura 17 Mesclagem de arquivos com uso do meshmixer

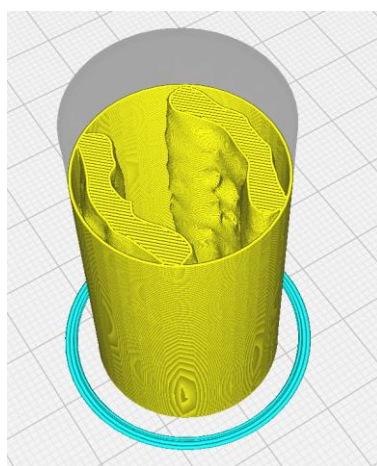


Figura 18 Corpo de prova otimizado topologicamente com uma parede

3.3 Fatiamento

Os modelos otimizados topologicamente foram importados para o software Ultimaker Cura versão 5.5.0, onde foi realizado o fatiamento dos objetos 3D, convertendo-os para o formato G-code, o que possibilitou a verificação da massa de filamento necessária para a fabricação dos provetes. Após a verificação da massa dos corpos otimizados, o fatiamento do corpo de prova padrão foi executado, utilizando os padrões de preenchimento grid e triangular (Figura 19), para fins de comparação entre os métodos de fabricação.

A temperatura utilizada para a extrusão do material foi de 235 °C e a temperatura da mesa foi de 110 °C, a altura de camada utilizada foi de 0,2 mm, a espessura selecionada para a base e o topo dos provetes foi de 1,2 mm, assegurando que tanto as amostras otimizadas topologicamente quanto aquelas produzidas com preenchimento padrão fossem totalmente preenchidas em sua base. Também foi utilizado um *Brim* de 8 mm para aumentar a superfície de contato, evitando que os

provetes se descolassem da superfície da mesa durante a impressão, evitando defeitos, como a falta de paralelismo entre a base e o topo do corpo de prova ou a distorção das camadas. As velocidades de impressão padrão da impressora não foram alteradas, mantendo-se a velocidade de 60 mm/min, conforme recomendado pelo fabricante. Para garantir uma boa aderência entre as camadas e assegurar que a linha de solda fosse uniforme em todas as amostras, optou-se por imprimir cada uma delas separadamente.

Cada amostra sem a adição de uma parede externa apresentou uma massa total de 10 g. Nas amostras com a adição de uma parede externa, houve um aumento de 1 g no material utilizado, resultando em corpos de prova com massa total de 11 g. Esse incremento demonstra o impacto da parede externa na quantidade de material empregado, o que pode influenciar diretamente a resistência mecânica das amostras.

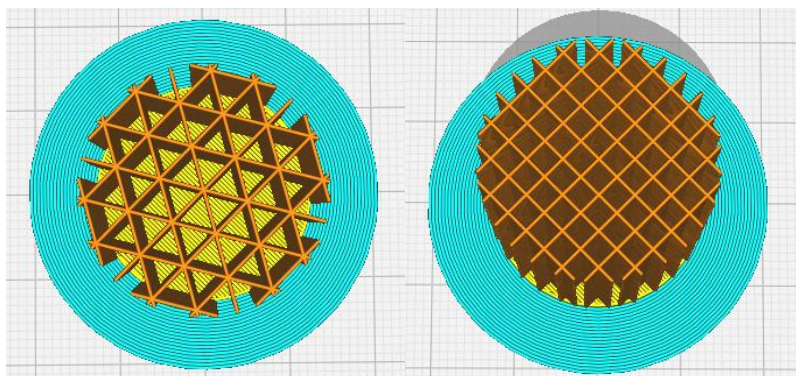


Figura 19 Teste de massa dos provetes com preenchimento padrão

3.4 Simulação

Buscando realizar comparações preliminares, foram feitas simulações dos modelos gerados utilizando o *software* Cura, o programa de fatiamento empregado na criação dos modelos. A partir do fatiamento realizado com os padrões *grid* e triangular, foi analisado o padrão de linhas gerado por cada um. Esses padrões foram então replicados no SolidWorks, como visto na Figura 20 à 23, permitindo a realização das simulações com base na geometria de preenchimento real, para avaliar o comportamento estrutural de cada configuração. Então gerou-se uma malha com 0,5

mm de tamanho de elemento para a realização das simulações assim como a utilizada nas otimizações. Também se definiu a carga de 2kN no topo do provete e a geometria fixa na base. Para isso, também foi necessária a realização de uma adaptação do material presente no SolidWorks para que fosse mais próximo ao material utilizado na impressão assim como realizado na otimização.

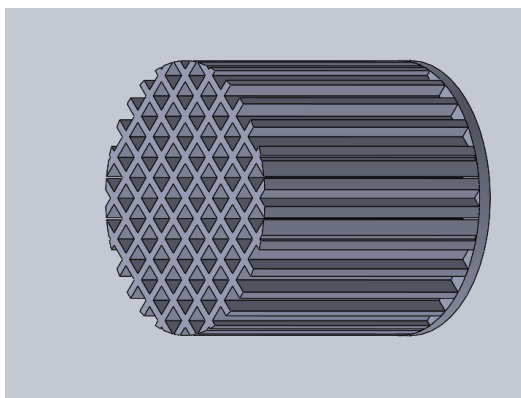


Figura 20 Padrão grid

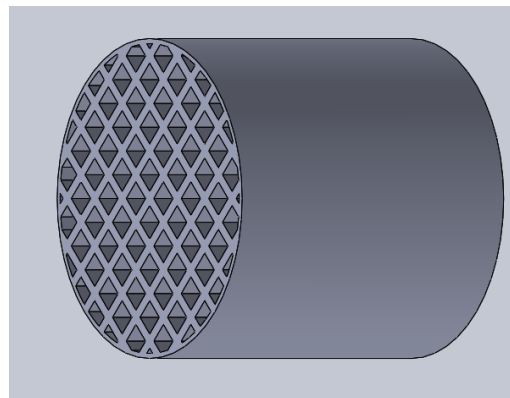


Figura 21 Padrão grid com parede

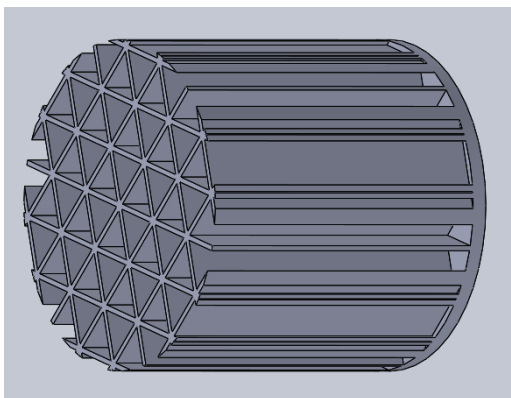


Figura 22 Padrão triangular

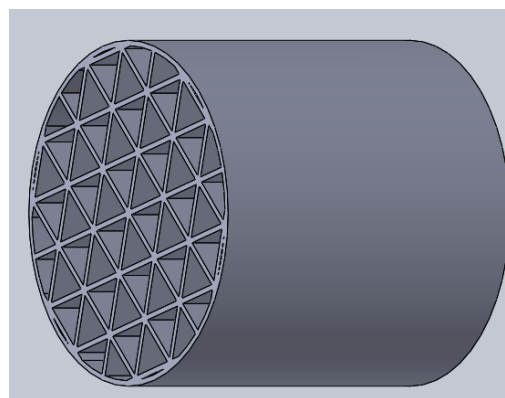


Figura 23 Padrão triangular com parede

3.5 Impressão 3D

A impressão dos corpos de prova foi realizada em uma impressora Anycubic Kobra 2 Neo, Figura 24. No entanto, como os provetes foram impressos em ABS e o modelo da impressora não possui um sistema de enclausuramento próprio, tornando necessário realizar uma adaptação para evitar grandes variações de temperatura durante o processo de impressão, o que poderia causar imperfeições devido à elevada contração térmica do material. Após monitoramento, foi constatada uma temperatura média de 58 °C dentro do enclausuramento, o que foi crucial para evitar a deformação nas camadas inferiores e o descolamento da peça da mesa, fatores que poderiam

comprometer a impressão e exigir o reinício do processo. Foram impressas 5 amostras de cada variância possibilitando a análise estatística e fabricadas de forma individual, ou seja uma de cada vez, garantindo uma boa adesão entre as camadas.



Figura 24 Impressora Anycubic Kobra 2 Neo

3.6 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão foi conduzido em uma máquina universal de ensaios da marca Shimadzu (Figura 25), disponibilizada pelo Laboratório de Engenharia de Resistência dos Materiais (LERM) do Instituto Politécnico de Bragança. A máquina conta com uma célula de carga de 10 kN e está equipada com dois pratos adequados para a realização do ensaio de compressão.



Figura 25 Máquina universal de ensaios da Shimadzu

Os ensaios foram realizados em conformidade com a norma ASTM D695-15 (ASTM, 2015), que estabelece uma velocidade inicial de 1,3 mm/min para o ensaio de compressão, sendo esta aumentada para 6 mm/min após o escoamento do material.

Para garantir a uniformidade no posicionamento das amostras durante os ensaios, foi necessário determinar o centro do prato de compressão, de modo a que todas as amostras fossem colocadas no mesmo local, para garantir a equidade dos testes, conforme ilustrado na Figura 26.



Figura 26 Marcação do centro do prato de compressão

3.7 Análise estatística

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente utilizando a metodologia ANOVA no software Excel, com o intuito de comparar os diferentes corpos de prova. As comparações foram realizadas entre as seguintes condições: Triangular *versus* Grid, Grid *versus* otimização topológica com parede mantida, Triangular *versus* Triangular com parede, Grid *versus* Grid com parede, Grid com parede *versus* Triangular com parede, otimização topológica *versus* otimização topológica com uma parede, e otimização topológica *versus* otimização topológica com parede mantida. Onde o F crítico ou Fischer crítico definido foi 5,317655; o alpha definido foi 0,05; SQ é a soma dos quadrados; QM os Quadrados médios; F é o valor

de Fischer e o valor de P é a probabilidade de que a diferença entre as amostras seja ao acaso.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão abordados e discutidos os resultados obtidos a partir do estudo da otimização topológica aplicada à impressão 3D, considerando-a como uma alternativa de preenchimento em relação aos meios gerados automaticamente por programas de fatiamento. Os modelos foram dimensionados, simulados, fatiados, impressos, ensaiados e seus respectivos resultados foram analisados.

4.1 Otimização topológica

Ao definir os parâmetros de restrição, foi inicialmente selecionada uma redução de massa de 50%, com o objetivo de otimizar a relação entre resistência e redução de massa. Nessa fase inicial, não foram aplicadas restrições de simetria resultando em uma geometria otimizada semelhante à representada na Figura 27.

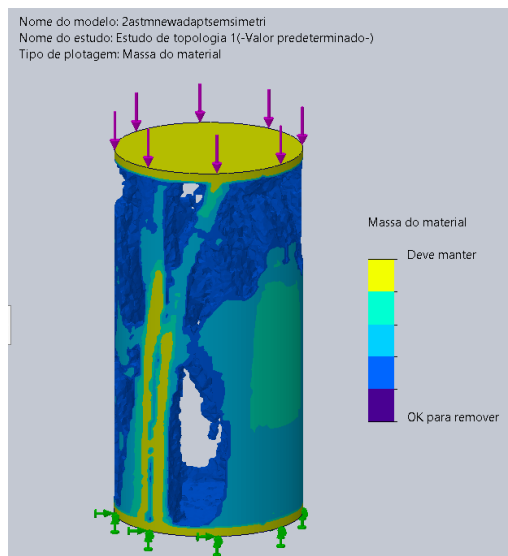


Figura 27 Otimização topológica sem simetria

Conforme observado na Figura 27, o modelo inicial não apresentou simetria, com remoção de material de forma não uniforme, resultando em uma má distribuição dos esforços e, potencialmente, comprometendo o desempenho estrutural. Em uma segunda etapa, foi adicionada a restrição de meia simetria, dividindo o corpo por meio de um plano frontal (Figura 28). Posteriormente, foi inserido o plano direito como um segundo plano de simetria, resultando em uma configuração com simetria de um quarto (Figura 29).

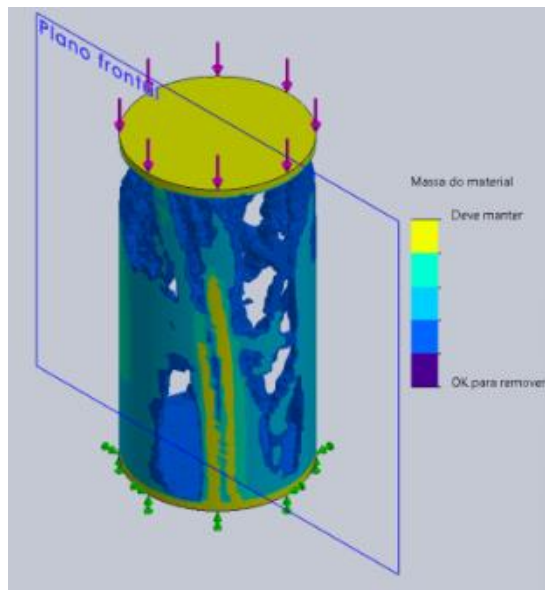


Figura 28 Otimização topológica com simetria de meio

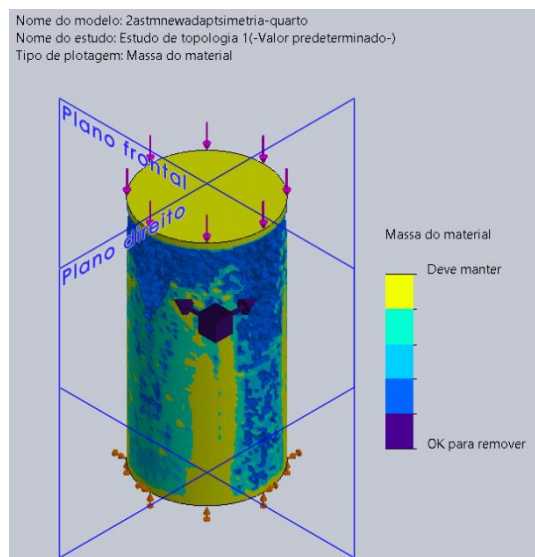


Figura 29 Otimização topológica com simetria de um quarto

Assim como no teste de otimização sem plano de simetria, a remoção de material nos testes iniciais com simetria parcial mostrou falta de uniformidade, o que indicou a necessidade de adicionar mais um plano de restrição. Finalmente, foram aplicados os três planos de construção frontal, direito e superior, gerando um corpo com simetria de um oitavo, ou seja, dividido em 8 partes iguais (Figura 30). Esse ajuste resultou em uma remoção de material mais uniforme e em uma melhor distribuição dos esforços na amostra, melhorando a eficiência estrutural do corpo otimizado.

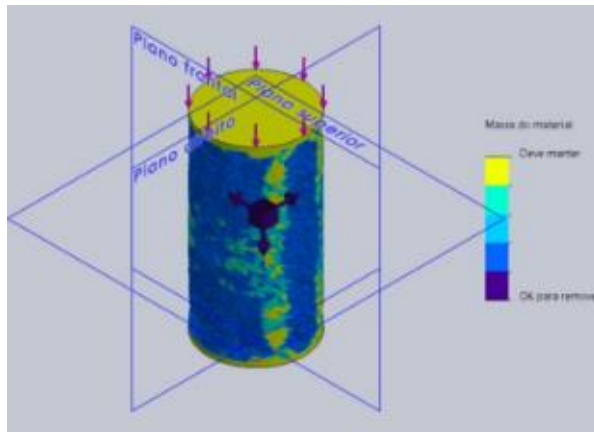


Figura 30 Modelo final otimizado topologicamente.

Então foi realizada novamente a otimização topológica do modelo, utilizando as mesmas condições de contorno previamente mencionadas e adicionando a restrição de "parede mantida" com uma espessura mínima de 2 mm. Esse processo resultou em um corpo de prova com um aspecto externo semelhante ao original, como mostrado nas Figura 31 e Figura 32. A inclusão dessa restrição permitiu manter a integridade da parede externa, enquanto a otimização interna foi ajustada para melhorar a distribuição de material e resistência.

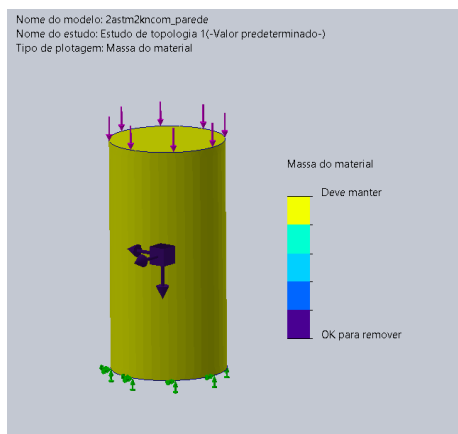


Figura 31 Modelo com parede externa preservada

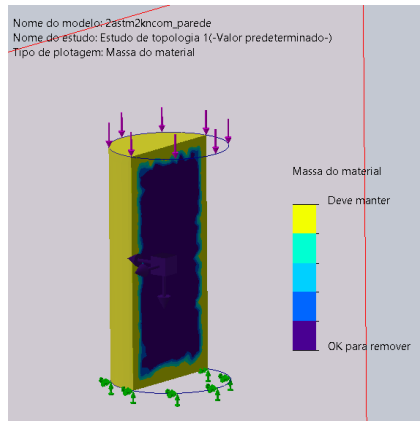


Figura 32 Vista de corte do modelo com parede preservada

4.2 Simulações

Após a replicação do modelo gerado no fatiador para o SolidWorks, foram realizadas simulações em cada uma das variações, aplicando-se um esforço de 2 kN na face superior do cilindro. Partindo do princípio de que quanto maior as tensões de Von Mises (Tabela 2) obtidas nas simulações, menores as cargas necessárias para a falha dos modelos, constatou-se que, entre as quatro amostras com preenchimento padrão, a amostra que apresentou a maior resistência mecânica foi a com padrão *grid* e adição de uma parede externa, seguida pela amostra com padrão *grid* sem parede. Em sequência, veio o padrão triangular com parede, e, por fim, o padrão triangular sem parede, que demonstrou o pior desempenho, conforme ilustrado na Figura 33, Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Tabela 2 Tensões de Von Mises (Simulado)

Modelo	Tensão Von Mises Máximas Mpa\
Grid	8,71
Grid com parede	10,32
Triangular	14,79
Triangular com parede	23,13

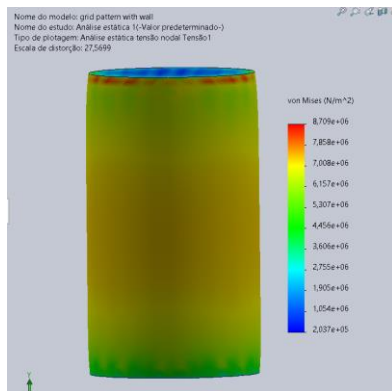


Figura 33 Simulação grid com parede

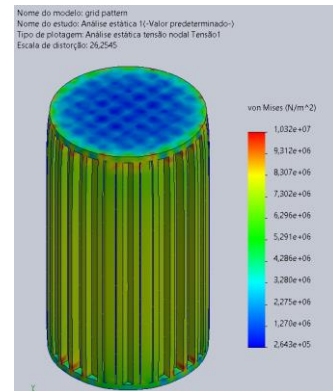


Figura 34 Simulação grid

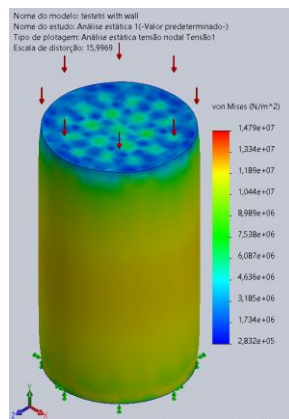


Figura 35 Simulação triangular com parede

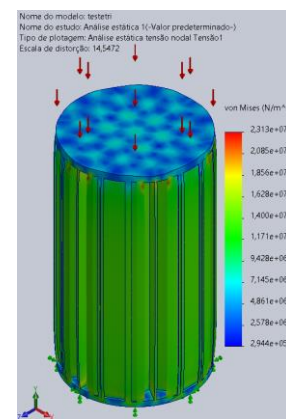


Figura 36 Simulação triangular

4.3 Impressão 3D

O resultado da impressão 3D pode ser observado na Figura 37, o resultado mostra um corpo com bom paralelismo entre topo e base e uma boa adesão de camadas, sem nenhuma falha de preenchimento aparente.

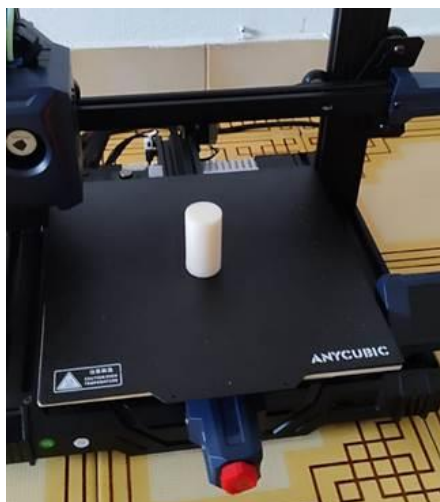


Figura 37 Impressão dos provetes

4.4 Ensaio de compressão

Durante os testes, foi possível observar uma tendência de ruptura no ponto de solda entre as camadas, o que é uma característica comum na impressão 3D. Além disso, nas peças impressas com preenchimento padrão, observou-se um comportamento de cisalhamento a 45° , o que era esperado, já que as tensões máximas nos corpos de prova tendem a se concentrar nesse ângulo.

No entanto, esse comportamento de cisalhamento a 45° não foi observado nos corpos otimizados topologicamente. Além disso, verificou-se que os corpos de prova otimizados topologicamente apresentaram um desempenho inferior em comparação com aqueles com preenchimento padrão, tanto em termos de resistência quanto de comportamento em tensão crítica de falha, como apresentado na Tabela 3, no qual letras idênticas significam que não houve diferença estatística significativa, como os presentes nos padrões triangular com parede e grid. As curvas tensão-deformação representativas de cada amostra estão ilustradas no Gráfico 1.

Tabela 3 Tensão limite de escoamento de cada variação

Amostras	Tensão limite de escoamento (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Coefficiente de segurança
Triangular (TRI)	39a	0,36	9,88
Grid (GRID)	42b	0,31	10,64
Triangular com parede (TCP)	44b	1,39	11,15
Grid com parede (GP)	47c	1,11	11,91
Otimizado topologicamente (OTM)	21d	0,74	5,32
Otimizado topologicamente com parede mantida (OTMPM)	26e	0,41	6,59
Otimizado topologicamente com uma parede (OTM1P)	21d	0,73	5,32

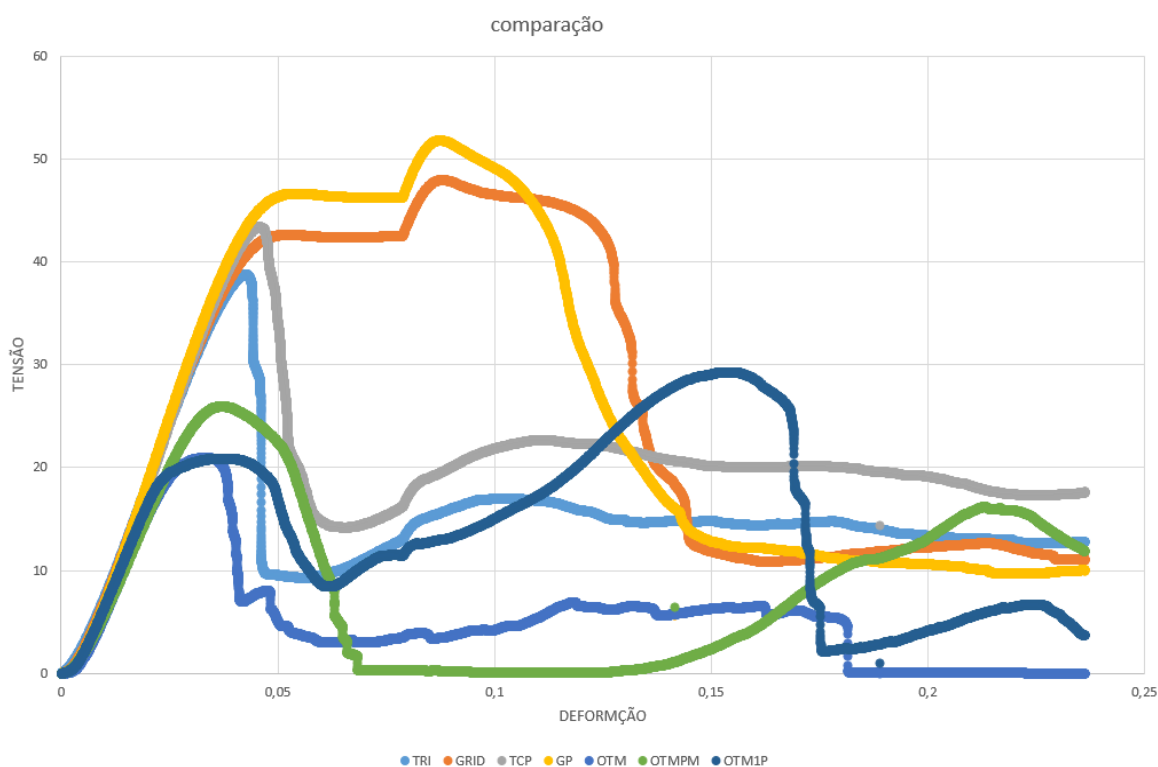


Figura 38 Comparação dos resultados obtidos por ensaio de compressão

Por meio da Figura 38 foi observado um comportamento frágil nas amostras com o padrão de preenchimento triangular (TRI e TCP), visto que houve um decaimento abrupto de 30 MPa depois do pico correspondente a tensão de escoamento de máximo.

Os comportamentos das amostras impressas com o padrão otimizado topologicamente apresentaram um desempenho significativamente inferior em comparação às com o padrão de fatiamento convencional. As amostras otimizadas (OTM e OTM1P) suportaram apenas 61,9% da carga total alcançada pelo padrão *grid* com uma parede externa, que foi o que demonstrou a maior resistência entre as amostras. Isso sugere que, apesar da redução de material proporcionada pela otimização topológica, o padrão gerado, com distribuição de massa não uniforme, não foi capaz de suportar cargas tão elevadas quanto os padrões tradicionais de preenchimento, como o *grid*.

Entre os modelos otimizados topologicamente, aquele que apresentou o melhor resultado foi o que manteve a região externa preservada (OTMPM), como ilustrado na Figura 38. A preservação da região externa permitiu uma distribuição mais uniforme

dos esforços, resultando em um desempenho superior. A otimização, ao focar na preservação da estrutura externa e remover apenas material da parte interna, contribuiu para a melhor performance da amostra em comparação à otimização que não preservou a área externa, a qual resultou na remoção de material tanto da parede externa quanto da seção interna do modelo. Essa abordagem evidenciou a importância de considerar a integridade estrutural nas estratégias de otimização topológica.

Analisando as amostras nas quais foi adicionada apenas uma parede externa foi possível observar que as com preenchimento apresentaram melhora mais significativas na resistência mecânica do que as otimizadas topologicamente, sendo que nos padrões grid e triangular foi possível observar uma melhoria de 11,9% e 12,82%, respectivamente. Enquanto, na amostra otimizada topologicamente não houve melhora, isso muito provavelmente se deve ao fato de os provetes com preenchimento padrão serem de certa forma amarrados na parede externa, com a utilização de um *overlap* de 30%, o que auxilia ainda mais na distribuição dos esforços, enquanto na otimizada, a amostra tem pouco contato com a parede externa, fazendo com que não possua tanta interferência na sua resistência mecânica.

Conforme citado anteriormente, as tensões máximas de cisalhamento se dão a 45° da base do corpo de prova, sendo assim, o esperado era uma ruptura a 45°. Visualizando o quadro 1, esse comportamento pode ser observado nas amostras com o padrão Grid, Grid com parede e triangular, presentes nas três primeiras linhas. No padrão triangular com parede, observou-se um direcionamento do preenchimento para as laterais da amostra e uma tendência de ruptura da parede na região de solda do material, como pode ser observado na quarta linha.

Por fim, analisando as amostras otimizadas, a ruptura da amostra otimizada sem parede ocorreu sempre em um dos lados da amostra primeiro, sendo que após o rompimento da primeira lateral o corpo de prova colapsava por completo de forma similar ao encontrado na quinta linha do quadro. Já o corpo de prova com uma parede, apesar de possuir uma resistência muito próxima ao provete sem a parede, apresentou uma ruptura mais gradual, por conta da única camada de parede ser capaz de segurar as laterais do corpo de prova, como pode ser observado na sexta linha do Figura 39. Já o corpo de prova com a região da parede externa preservada, o qual

apresentou a maior resistência entre os corpos gerados por otimização topológica, apresentou uma pequena deformação plástica antes de sua ruptura frágil como observado na última linha até sua ruptura, que apresentou um comportamento mais dúctil.

Após a análise do Figura 38 e das imagens no Figura 39 é possível afirmar que todas as amostras possuem fratura frágil. Ressaltando que no padrão grid foi possível observar um platô na curva, causado por conta do escorregamento da parte de cima do provete até a base do prato de compressão e a única amostra a qual foi possível observar uma pequena deformação plástica foi a otimizada com parede mantida.

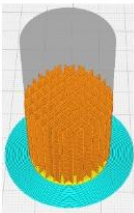

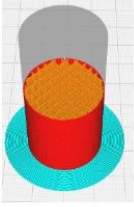

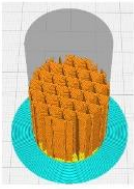

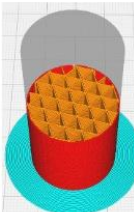

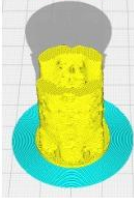

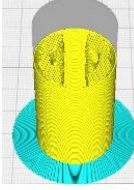

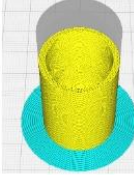

Amostra	Modelo fatiado	Após ensaio
Grid		
Grid com parede		
Triangular		
Triangular com parede		
Otimizado sem parede		
Otimizado com parede		
Otimizado com parede preservada		

Figura 39 Corpos de prova após a falha

4.5 Análise de variância - ANOVA

A verificação estatística dos corpos de prova foi realizada utilizando ANOVA como citado anteriormente, realizando a comparação de medidas por meio da distribuição F de Fischer e utilizando um alpha com valor de 0,05. Para tanto, foi usada a ferramenta de análise de dados do excel para realizar a comparação entre as amostras pelos pares citados anteriormente no capítulo 3, Tabelas 4 a 11.

Após a realização da análise foi possível concluir que as amostras grid e triangular com parede possuem comportamentos mecânicos estatisticamente semelhantes, como constatou-se pelas Tabela 12, assim como o otimizado topologicamente (OTM) e o otimizado topologicamente com uma parede (OTM1P), como visto na Tabela 11. Da mesma forma, os padrões grid com parede (GP), triangular (TRI) e otimizado topologicamente com parede mantida (OTMPM), demonstraram comportamentos únicos entre as amostras, Tabelas 6 a 9.

Tabela 4 Grid X Triangular

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	48,2016	1	48,2016	429,7838	3,07E-08	5,317655
Dentro de grupos	0,897225	8	0,112153			
Total	49,09883	9				

Tabela 5 Grid com parede X Triangular com parede

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	21,90242	1	21,90242	13,85103	0,005857	5,317655
Dentro de grupos	12,65028	8	1,581285			
Total	34,5527	9				

Tabela 6 Grid X Grid com parede

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	39,29066	1	39,29066	58,68426	5,96E-05	5,317655
Dentro de grupos	5,356212	8	0,669526			
Total	44,64687	9				

Tabela 7 Triangular X Triangular com parede

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	72,77731	1	72,77731	71,07775	2,99E-05	5,317655
Dentro de grupos	8,19129	8	1,023911			
Total	80,9686	9				

Tabela 8 Grid X Otimizado topologicamente com parede mantida

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	701,0784	1	701,0784	5270,584	1,44E-12	5,317655
Dentro de grupos	1,064138	8	0,133017			
Total	702,1425	9				

Tabela 9 Grid com parede X Otimizado topologicamente com uma parede

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	1662,191	1	1662,191	1874,769	8,93E-11	5,317655
Dentro de grupos	7,09289	8	0,886611			
Total	1669,284	9				

Tabela 10 Otimizado topologicamente X Otimizado topologicamente com parede mantida

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	62,69365	1	62,69365	175,917	9,96E-07	5,317655
Dentro de grupos	2,851056	8	0,356382			
Total	65,54471	9				

Tabela 11 Otimizado topologicamente X Otimizado topologicamente com uma parede

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	0,011221	1	0,011221	0,020854	0,88875	5,317655
Dentro de grupos	4,304716	8	0,538089			
Total	4,315937	9				

Tabela 12 Grid X Triangular com parede

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	2,522456	1	2,522456	2,49897	0,152576	5,317655
Dentro de grupos	8,075184	8	1,009398			
Total	10,59764	9				

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi realizado o estudo da resistência mecânica de peças impressas com preenchimento padrão de impressão e o preenchimento obtido com a ajuda da otimização topológica. Com o trabalho foi possível perceber que todas as amostras suportaram a carga de 2kN para a qual foram dimensionadas, porém os modelos otimizados não foram capazes de superar a resistência mecânica dos provetes com preenchimento padrão, muito provavelmente por conta da não uniforme distribuição de massa.

Durante o trabalho foi possível realizar a comparação entre as diferentes restrições de simetria e definição de malha, sendo determinada a simetria de 1/8 como a que obteve melhor distribuição dos esforços e da massa. O efeito da única parede externa adicionada as amostras grid, triangular e otimizado sem parede, se mostrou mais efetivo nos padrões grid e triangular. Isso se deu porque foi capaz de amarrar sua estrutura, distribuindo melhor as tensões, por conta do *overlap* de 30%, definidos no momento do fatiamento. Enquanto no otimizado isso não ocorreu, por conta da falta de contato entre a estrutura interna e a casca externa, não possuindo nenhum efeito na resistência mecânica dessa amostra. Por fim, também foi possível observar o comportamento da fratura frágil em todos os provetes, sendo que apenas o modelo otimizado com parede mantida apresentou uma pequena deformação plástica antes da fratura. Por fim a análise de variância (ANOVA), que confirmou diferenças estatisticamente significativas entre as amostras, exceto nas comparações entre as otimizadas topologicamente sem parede e uma única parede e o padrão grid e triangular com parede.

5.1 Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros é interessante a realização de novas comparações entre preenchimentos de impressão 3D com modelo original e peças otimizadas topologicamente, com uma redução gradual de massa como 10%, 20%, 30% até 50%, numa sequência de otimizações uma sobre a outra.

REFERÊNCIAS

- Ahmad, A., Abbas, A., Hussain, G., Al-Abbasi, O., Alkahtani, M., & Altaf, K. (2023). Performance evaluation of 3D printed polymer heat exchangers: influence of printing temperature, printing speed and wall thickness with consideration of surface roughness.
- Alves, F. J., Braga, F. J., Simão, M. S., Neto, R. J., & Duarte, T. M. (2001). *Prototipagem rápida*. Porto: ProtoClick.
- Ashtankar, K. M., Kuthe, A. M., & Rathour, B. S. (02 de 04 de 2014). Effect of Build Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyping (Fused Deposition Modelling) Made Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) Parts.
- ASTM. (2015). Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics. Designation: D695 – 15.
- Bugatti. (2018). World premiere: brake caliper from 3-D printer.
- Dassault SolidWorks. (2018). *PROJETO POR MEIO DE ANÁLISE: MELHORAR O PROJETO DO PRODUTO E AUTOMATIZAR A FABRICAÇÃO COM OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA*.
- Dassault SolidWorks. (2019). Método SIMP para otimização de topologia.
- Deckard, C., & Beaman, J. (1988). Process and control issues in selective laser sintering.
- Dey, A., & Yodo, N. (2019). A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics.
- Feng, L., Wang, Y., & Wei, Q. (22 de 04 de 2019). PA12 Powder Recycled from SLS for FDM.
- Folger, O. (2015). *Topology optimization of a mounting bracket*.

- Garcia, A., Spim, J. A., & Santos, C. A. (2012). *Ensaio dos materiais* (Segunda edição ed.). Rio de Janeiro: LTC.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies* (Segunda Edição ed.). Springer. doi:10.1007/978-1-4939-2113-3
- Huang, S., Liu, P., Mokasdar, A., & Hou, L. (2013). Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *Int J Adv Manuf Technol*.
- Kurowski, P. M. (2015). *Engineering Analysis with SOLIDWORKS Simulation 2015*.
- Linke, R. (2017). *Additive manufacturing, explained*. MIT.
- Mazlan, M. A., Anas, M. A., Izmin, N. A., & Abdullah, A. H. (2023). Effects of Infill Density, Wall Perimeter and Layer Height in Fabricating 3D Printing Products.
- Molenaar, J. M., & Ingeassia, D. (2024). *Mastering Digitally Controlled Machines*. Apress.
- Ntintakis, I., & Stravroulakis, G. E. (07 de 2022). Infill Microstructures for Additive Manufacturing.
- Porsche. (2023). 3D printing technology optimises pistons for the powerful 911 GT2 RS.
- Rajan, K., Samykano, M., Kadirgama, K., Sharuzi, W., Harun, W., & Rahman, M. M. (26 de Fevereiro de 2022). Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications.
- Simmons, J. (2024). 3D Print Infill Patterns Explained.
- Solomon, I. J., Sevel, P., & Gunasekaran, J. (2021). A review on the various processing parameters in FDM.
- Standard, I. (2015). Additive manufacturing - General principles - Part 2: Overview of process categories and feedstock ISO 17296-2.

Sunlu. (2021). Fonte:

[https://cdn.shopifycdn.net/s/files/1/0152/6507/1190/files/07_SUNLU_ABS_fila
ment-SDS.pdf?v=1693154741](https://cdn.shopifycdn.net/s/files/1/0152/6507/1190/files/07_SUNLU_ABS_fila
ment-SDS.pdf?v=1693154741)