



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DESIGN HÍBRIDO POR MANUFATURA ADITIVA: OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA  
E MESOESTRUTURAS PARA ALTO DESEMPENHO MECÂNICO**

**BEATRIZ ASSIS KALB**

Foz do Iguaçu  
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**ENGENHARIA DE MATERIAIS**

**DESIGN HÍBRIDO POR MANUFATURA ADITIVA: OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA E  
MESOESTRUTURAS PARA ALTO DESEMPENHO MECÂNICO**

**BEATRIZ ASSIS KALB**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu

Foz do Iguaçu

2025

BEATRIZ ASSIS KALB

**DESIGN HÍBRIDO POR MANUFATURA ADITIVA: OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA E  
MESOESTRUTURAS PARA ALTO DESEMPENHO MECÂNICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Orientador: Prof. Dr. Rafael Drumond Mancosu  
UNILA

---

Prof. Dr. Eduardo Gonçalves Reimbrecht  
UNILA

---

Profa. Dra Daiane Calheiro Evaldt  
UNILA

Foz do Iguaçu, \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me apoiou e acreditou em mim.

## RESUMO

As indústrias modernas, como as aeroespaciais, de aviação e automotivas, enfrentam o desafio latente de otimizar o desempenho estrutural de suas peças exigindo mínimo peso e máxima resistência em um contexto de necessidade de redução de custos e tempo de desenvolvimento. A Manufatura Aditiva oferece o potencial para produzir geometrias complexas, como mesoestruturas, e por meio da combinação deste com otimização de topologia, criar designs híbridos. No entanto, nota-se uma escassez crítica de dados experimentais e literatura técnica que comprovem e quantifiquem os ganhos mecânicos dessa abordagem, o que impede sua plena adoção na engenharia.

Com o objetivo de preencher essa lacuna de pesquisa, o presente trabalho foca na investigação e otimização de comportamento mecânico, mesoestruturas e otimização de topologia por manufatura aditiva plástica.

Para tal, foi realizado um estudo experimental e otimização multi-objetivo de mesoestruturas através de um planejamento fatorial, que identificou o tipo e a densidade celular como os fatores com maior efeito na resistência à flexão e massa. A combinação ótima resultou no tipo P-Skeletal, com densidade celular de 1,4, tamanho de aresta de 7mm e inclinação de 0°.

Em seguida, foi modelado uma peça estrutural para estudo de caso, esse modelo passou por otimização de topologia e foi aplicada a mesoestrutura otimizada em seus espaços vazios. Foram simuladas por elementos finitos condições de carregamento para comparar o comportamento da peça pré e pós otimização, o que resultou em uma redução de 31,13% da massa e uma diminuição nas propriedades mecânicas da peça.

**Palavras-chave:** Mesoestruturas; Otimização de topologia; Análise de elementos finitos; Otimização multi-objetivo; Manufatura aditiva.

## RESUMEN

Las industrias modernas, como la aeroespacial, la aviación y la automotriz, se enfrentan al desafío latente de optimizar el rendimiento estructural de sus piezas exigiendo peso mínimo y máxima resistencia en un contexto de necesidad de reducción de costos y tiempo de desarrollo. La fabricación aditiva ofrece el potencial de producir geometrías complejas, como las mesoestructuras y mediante la combinación de estas con la optimización topológica, permite crear diseños híbridos. Sin embargo, se observa una escasez crítica de datos experimentales y literatura técnica que prueben y cuantifiquen las ganancias mecánicas de este enfoque, lo que impide su plena adopción en la ingeniería.

Con el objetivo de llenar esta brecha de investigación, el presente trabajo se centra en la investigación y optimización del comportamiento mecánico de mesoestructuras, y la aplicación de la Optimización Topológica en la fabricación aditiva plástica.

Para ello, se llevó a cabo un estudio experimental y una optimización multiobjetivo de mesoestructuras mediante un diseño factorial, que identificó el tipo y la densidad celular como los factores con mayor efecto en la resistencia a la flexión y la masa. La combinación óptima resultó ser del tipo P-Skeletal, con una densidad celular de 1,4, un tamaño de borde de 7mm y un ángulo de inclinación de 0°.

A continuación, se modeló una pieza estructural para un estudio de caso. Este modelo fue sometido a la optimización topológica y se aplicó la mesoestructura optimizada en sus espacios vacíos. Se simularon por elementos finitos condiciones de carga para comparar el comportamiento de la pieza antes y después de la optimización, lo que resultó en una reducción del 31,13% de la masa y una disminución en las propiedades mecánicas de la pieza.

**Palabras Clave:** Fabricación aditiva, Optimización topológica, Mesoestructuras, Optimización multiobjetivo, Análisis de elementos finitos.

## ABSTRACT

Modern industries, such as aerospace, aviation, and automotive, face the latent challenge of optimizing the structural performance of their parts—demanding minimum weight and maximum strength—within a context of cost reduction and development time constraints. Additive manufacturing offers the potential to produce complex geometries, such as mesostructures (or lattice structures), and through the combination with topology optimization, allows for the creation of hybrid designs. However, there is a critical scarcity of experimental data and technical literature that proves and quantifies the mechanical gains of this approach, hindering its full adoption in engineering.

With the aim of filling this research gap, the present work focuses on the investigation and optimization of the mechanical behavior of mesostructures, and the application of topology optimization in plastic additive manufacturing.

To this end, an experimental study and multi-objective optimization of mesostructures were conducted using a factorial design, which identified the cell type and density as the factors with the greatest effect on flexural strength and mass. The optimal combination was found to be the P-Skeletal type, with a cell density of 1,7, an edge size of 7mm, and an inclination angle of 0°.

Subsequently, a structural part was modeled for a case study. This model underwent topology optimization, and the optimized mesostructure was applied to its void spaces. Loading conditions were simulated using finite element analysis to compare the behavior of the part pre- and post-optimization, which resulted in a 31.13% reduction in mass and a decrease in the mechanical properties of the part.

**Keywords:** Additive manufacturing, Topology optimization, Lattice structures, Multi-objective optimization, Finite element analysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 01</b> – Classificação de manufatura aditiva de acordo com a ISO/ASTM 52900	16
<b>Figura 02</b> – Figura esquemática da estereolitografia (Adaptado)	17
<b>Figura 03</b> – Figura esquemática da estereolitografia em máscara (Adaptado)	18
<b>Figura 04</b> – Representação esquemática de como se dá o projeto generativo	20
<b>Figura 05</b> – Mesoestruturas baseadas em hastes do tipo CS, CFC e CCC	22
<b>Figura 06</b> – Mesoestruturas do tipo (a) TPMS Primitiva de Schwarz e (b) TPMS Diamante de Schwarz.	23
<b>Figura 07</b> – Mesoestruturas TPMS Primitiva de Schwarz baseadas em (a) esqueleto (P-Skeletal) e (b) plano (P-Sheet)	23
<b>Figura 08</b> – Mesoestruturas baseadas em cascas do tipo (a) Octeto-treliça, (b) Dodecaédrica Rômbica e (c) Cúbica com célula octaédrica	23
<b>Figura 09</b> – Gráficos de interação entre fator A e B, onde (a) não há efeitos de interação e (b) há efeitos de interação	26
<b>Figura 10</b> – Fluxograma de modelagem dos corpos de prova, onde temos a) a modelagem da célula unitária, (b) utilização de recurso de padrão linear para repetição da célula, c) recorte para as dimensões desejadas e d) adição de superfícies de apoio (tanto para produção dos corpos quanto para o ensaio de flexão)	30
<b>Figura 11</b> – Modelo das células unitárias	30
<b>Figura 12</b> – Modelo dos corpos de prova	31
<b>Figura 13</b> – Impressora 3D Creality Halot One	33
<b>Figura 14</b> – Máquina de teste universal	33
<b>Figura 15</b> – Modelo inicial do estudo de caso (mão francesa)	36
<b>Figura 16</b> – Parâmetros para análise estática do modelo inicial	36
<b>Figura 17</b> – Corpo de prova após ensaio de flexão de três pontos	39
<b>Figura 18</b> – Gráfico de efeitos principais para resistência à flexão, massa e resistência aparente	44
<b>Figura 19</b> – Gráfico de interação para resistência à flexão	44
<b>Figura 20</b> – Gráfico de interação para massa	45

<b>Figura 21</b> – Gráfico de interação para resistência à flexão relativa	45
<b>Figura 22</b> – Gráfico de pareto para (a) resistência à flexão,(b) massa e (c) resistência aparente	46
<b>Figura 23</b> – Resultado gráfico da otimização de topologia	47
<b>Figura 24</b> – Topologia proposta com 25% da massa original	48
<b>Figura 25</b> – Modelo com otimização de topologia suavizada	48
<b>Figura 26</b> – Design híbrido, otimização de topologia e mesoestrutura	49
<b>Figura 27</b> – Resultado da simulação do modelo inicial (Tensão de Von Mises)	50
<b>Figura 28</b> – Resultado da simulação do modelo inicial (Deslocamento)	51
<b>Figura 29</b> – Resultado da simulação do modelo inicial (Deformação)	51
<b>Figura 30</b> – Resultado da simulação do design híbrido (Tensão de Von Mises)	52
<b>Figura 31</b> – Resultado da simulação do design híbrido (Deslocamento)	52
<b>Figura 32</b> – Resultado da simulação do design híbrido (Deformação)	53

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1 PROBLEMÁTICA.....	13
1.2 JUSTIFICATIVA.....	13
1.3 OBJETIVO.....	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos.....	14
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 MANUFATURA ADITIVA.....	15
2.2 PROJETO GENERATIVO.....	18
2.2.1 Otimização de topologia.....	20
2.2.2 Mesoestruturas.....	21
2.3 OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA.....	24
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>27</b>
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	27
3.2 MATERIAIS.....	28
3.3 MÉTODOS E INSTRUMENTAÇÃO.....	28
3.3.1 Produção dos corpos de prova.....	29
3.3.2 Fatiamento dos Corpos de Prova.....	31
3.3.3 Produção dos Corpos de Prova.....	32
3.3.4 Ensaio de flexão de 3 pontos.....	33
3.3.5 Software de estatística.....	34
3.3.6 Estudo de Caso.....	35
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>38</b>
4.1 ENSAIOS DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS.....	38
4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	39
4.3 TESTE DE NORMALIDADE (RYAN-JOINER).....	40
4.4 TESTE DE GRUBBS (TESTE Q).....	41
4.5 ANÁLISE DE EFEITOS.....	42
4.6 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS.....	46
4.7 OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA.....	47
4.8 OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA COM MESOESTRUTURA.....	48
4.9 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DE ANÁLISE ESTÁTICA.....	49
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>54</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A pressão por inovação e a crescente competitividade nas indústrias têm encurtado o tempo disponível para a criação e lançamento de novos produtos ou serviços, dessa forma o tempo dedicado à pesquisa, desenvolvimento, prototipagem e testes é drasticamente reduzido (CERUTI; FERRARI; LIVERANI, 2017).

Outros grandes desafios na indústria moderna incluem a produção de peças com geometria complexa e a seleção de materiais adequados que ofereçam alta resistência mecânica aliada a baixo peso. Para superar essa problemática, a combinação de tecnologias como a manufatura aditiva, mesoestruturas e otimização topológica surge como uma solução promissora. Essas abordagens não só podem acelerar o processo produtivo e reduzir o custo de fabricação, mas também aumentar significativamente a resistência específica das peças, abrindo caminho para inovações em diversos setores (WANG et al., 2021).

A manufatura aditiva é um método produtivo baseado na adição sucessiva de material, camada por camada, a partir de um modelo digital 3D (CAD), capaz de produzir peças de geometria complexa, que muitas vezes não são possíveis de se obter por métodos subtrativos tradicionais, como fresagem, usinagem, etc (CRISTACHE, 2023).

Essa tecnologia é capaz de produzir estruturas complexas como as mesoestruturas, que podem ser caracterizadas como arranjos periódicos e repetitivos de elementos geométricos, como hastes, superfícies e cascas. Que além de apresentarem leveza, podem ser projetadas a fim de atender especificidades de projeto, possuindo alta rigidez específica e excelente absorção de energia (HADI; VIGNAT; VILLENEUVE., 2015), (KHAN; RICCIO, 2024).

A otimização de topologia é uma técnica avançada de otimização estrutural que tem como objetivo definir uma distribuição ótima de material dentro de um volume de projeto pré-estabelecido, dadas condições de carregamento, restrições volumétricas e objetivos de desempenho. Essa técnica, por meio do uso de algoritmos iterativos e simulação por Elementos Finitos, remove seletivamente o material menos solicitado, o que acaba resultando em geometrias complexas e orgânicas (KHAN; RICCIO, 2024), (WANG et al., 2021).

Esses espaços vazios gerados pela otimização podem ser preenchidos por mesoestruturas, que além de aumentar significativamente a resistência específica, pode agregar melhorando a absorção de energia ao impacto, melhorando a dissipação de

calor, ou ainda auxiliando na osteointegração em aplicações biomédicas (WANG et al., 2021).

## 1.1 PROBLEMÁTICA

Atualmente, as indústrias aeroespaciais, de aviação e automotivas enfrentam desafios, onde além da necessidade de minimizar custos, atender a programas de sustentabilidade e encurtar o tempo de entrega de novos produtos, há uma necessidade latente pela otimização de desempenho mecânico (minimização do peso e maximização de resistência).

Nesse contexto, a manufatura aditiva emerge como uma tecnologia promissora, possibilitando a produção de peças de maneira rápida, com baixa emissão de resíduos e com geometria complexa, como mesoestruturas. A combinação estratégica de design generativo para otimização de topologia e mesoestruturas, se demonstra altamente promissora para a eficiência estrutural desses setores, permitindo que uma peça mantenha 80% da rigidez de um bloco sólido, utilizando apenas 20% da massa original (GIBSON; ASHBY, 1999).

No entanto, a escassez crítica de dados experimentais e literatura técnica que comprovem esses ganhos impede a plena adoção e a tomada de decisão baseada em evidências, indicando uma lacuna de pesquisa fundamental.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A adoção de tecnologias de design avançado, como otimização de topologia e o emprego de mesoestruturas, demonstra ser um diferencial competitivo crucial para as indústrias modernas, principalmente nos setores aeroespacial, de aviação e automobilístico. Contudo, o desenvolvimento destas tecnologias encontra uma barreira significativa com a carência de profissionais qualificados e a escassez de literatura técnica disponível.

Este trabalho se justifica pela necessidade de caracterização de comportamento dessas estruturas, por meio de métodos experimentais e de simulação. Os resultados servirão como ferramenta base para guiar novos profissionais a iniciarem nesse campo de projeto avançado, impulsionando o desenvolvimento tecnológico e inovação no país.

## 1.3 OBJETIVO

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é investigar o comportamento mecânico de mesoestruturas e otimizar uma peça estrutura fabricada por manufatura aditiva plástica por meio do uso conjunto de otimização de topologia e mesoestrutura.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral deste trabalho, foram delimitados objetivos específicos:

- Estudar o comportamento mecânico de mesoestruturas;
- Identificar parâmetros ótimos para mesoestrutura, visando redução de massa e aumento de resistência mecânica;
- Simular otimização de topologia para aplicação no estudo de caso;
- Produzir um modelo híbrido com a otimização de topologia e mesoestrutura;
- Simular e comparar condições de carregamento para a peça pós e pré otimização;

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão discutidos a história, definições e classificações da manufatura aditiva, bem como sua importância para diversos segmentos da indústria. Além disso, também é abordado o uso de projeto generativo e otimização de topologia como ferramentas de design que em conjunto com mesoestruturas podem gerar peças mais resistentes e mais leves.

### 2.1 MANUFATURA ADITIVA

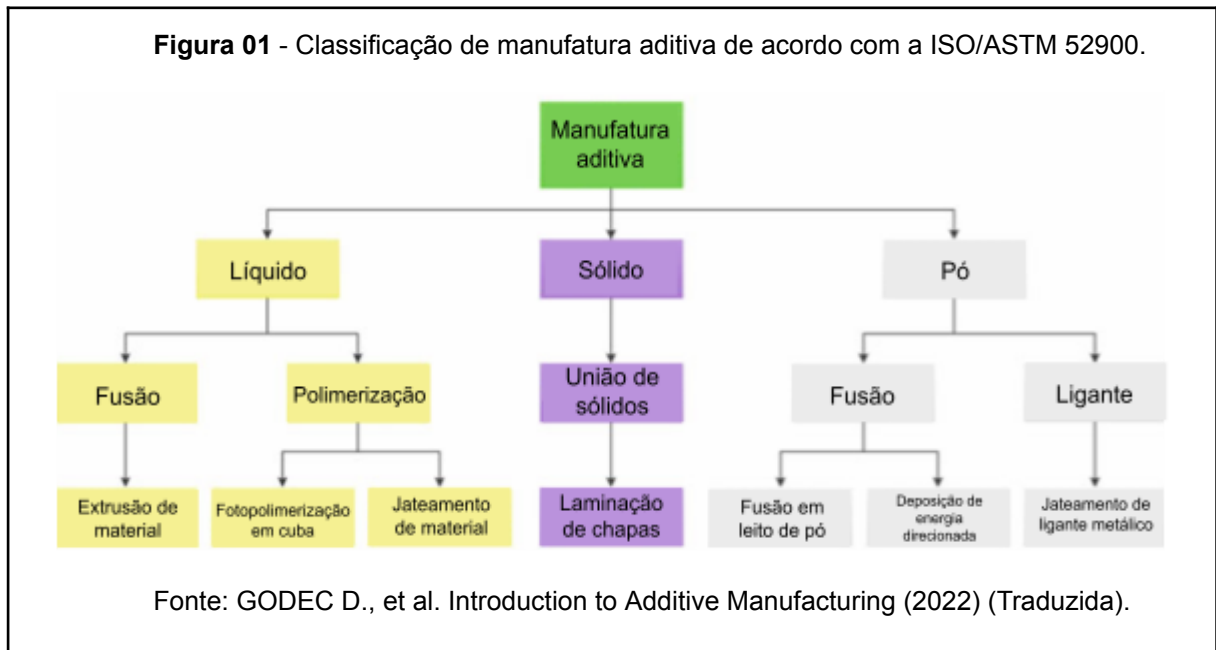
As indústrias enfrentam desafios crescentes na produção de peças de geometrias complexas, com um mercado cada vez mais competitivo e consumidores cada vez mais exigentes. Os métodos tradicionais fabris, ainda que eficientes, apresentam limitações quanto a forma, material, tempo e custos, o que faz com que haja cada vez mais uma necessidade por tecnologias inovadoras e disruptivas que ultrapassem esses limites (GODEC et al., 2022).

A manufatura aditiva surge então dessa demanda, oferecendo a possibilidade de materializar modelos digitais complexos, camada por camada, reduzindo custos, tempo de fabricação e geração de resíduos, além de oferecer qualidade superficial e precisão dimensional semelhante a processos convencionais como usinagem, fundição, sinterização, dentre outros (GODEC et al., 2022).

A impressão 3D, desde seu surgimento na década de 80, impulsionou o desenvolvimento de diversas tecnologias de manufatura aditiva, cada qual com suas particularidades, porém de forma geral todas seguem uma sequência base para produção das peças iniciando com a modelagem das peças em um software 3D, seguido pelo fatiamento, que consiste na divisão do modelo em camadas por meio de um software, a deposição de material camada por camada e por fim temos a peça final que pode ou não passar por um pós-processamento (YANG; WANG; YU, 2012).

De acordo com a ISO/ASTM 52.900 (2021) podemos classificar a manufatura aditiva em 3 grandes áreas de acordo com o estado da matéria-prima utilizada, são elas tecnologias a base de líquido, sólido e pó, como visto na figura

01. Dentro dessas categorias podemos dividir ainda em 7 categorias principais, levando em conta, processamento, material, acabamento, tipo de máquina, etc. São elas a extrusão de material, fotopolimerização em cuba, jateamento de material, laminação de chapas, fusão em leito de pó, deposição de energia direcionada e jateamento de ligante metálico.



As tecnologias a base de sólidos, como o próprio nome sugere, utilizam matéria-prima no estado sólido, como chapas e folhas metálicas ou plásticas, para a produção das peças. Dentre as principais tecnologias desta classificação, destaca-se a manufatura de objetos laminados, nela o material é depositado e pressionado sobre a camada anterior, unido com uso de ligantes ou solda e cortado, e o excesso de material pode ser removido por sucção a vácuo ou permanece como suporte para próxima camada (YANG; WANG; YU, 2012).

No estudo publicado por Cui e colaboradores é investigado a produção de folhas cerâmicas de alumina, a partir do uso de tecnologias de colagem de folhas cerâmicas para uso em manufatura de objetos laminados. Concluindo que as folhas produzidas apresentavam elasticidade suficiente para serem bobinadas, e sendo assim possível o uso conjunto dessas tecnologias para a produção de peças cerâmicas de geometrias complexas (CUI et al., 2005)

Já as tecnologias a base de pó, também conhecidas como fusão em leito de pó, são tecnologias extremamente complexas, com parâmetros difíceis de se

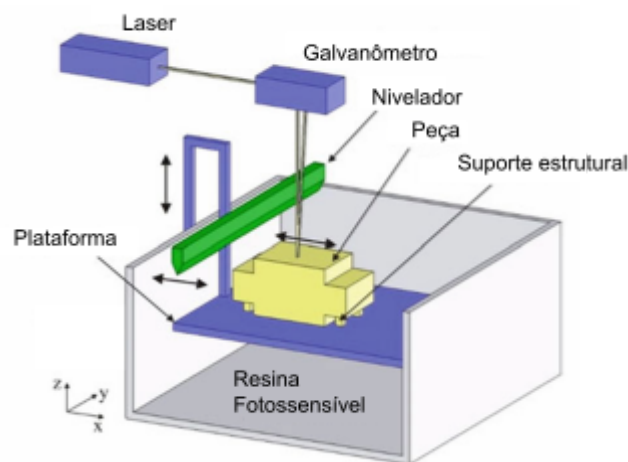
controlar, principalmente devido ao tamanho das partículas, que alteram a maneira com que o material se comporta (WILLIAMS; DECKARD, 1998).

A sinterização seletiva a laser se destaca como uma tecnologia a base de pó, em que um laser de alta potência sinteriza seletivamente as partículas de material em pó dentro de uma cuba, sendo adicionado sucessivamente mais pó a cada camada. Essa tecnologia, de acordo com estudos de Hao e colaboradores, é capaz de produzir enxertos ósseos a partir de hidroxiapatita (HAO et al., 2007).

Por fim, as tecnologias a base de líquidos, como o próprio nome sugere, utilizam materiais em seu estado líquido para produção das peças, sendo mais comum o uso de resinas fotopoliméricas e filamentos a base de polímeros termoplásticos com baixo ponto de fusão (GODEC et al., 2022).

A estereolitografia, (SLA), é destaque dentre as tecnologias a base de líquidos e também de forma geral dentre as tecnologias de manufatura aditiva. Tendo sido criada em 1984 por Chuck Hull, engenheiro físico, que revolucionou o mundo com sua invenção, capaz de criar objetos tridimensionais a partir de modelos digitais, utilizando-se de luz ultravioleta para solidificar camadas sucessivas de resina fotossensível, conforme demonstrado na figura 02 (JUNK; BÄR, 2023)

**Figura 02** - Figura esquemática da estereolitografia (Adaptado).

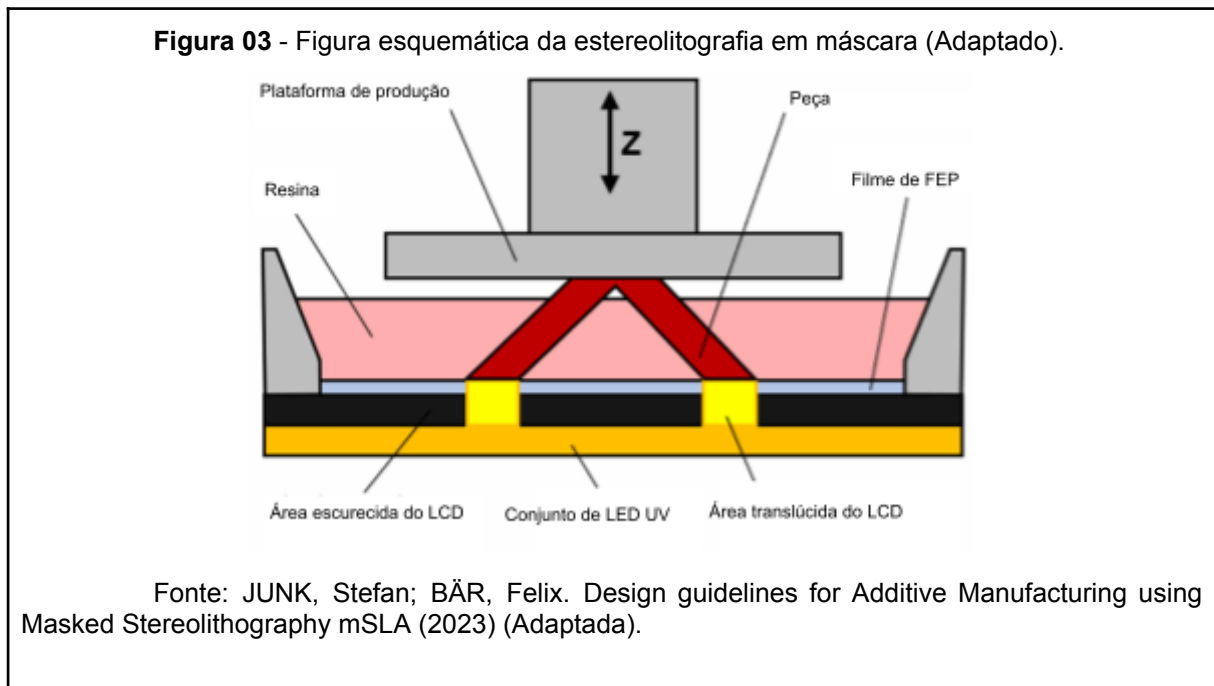


Fonte: GODEC D., et al. Introduction to Additive Manufacturing (2022) (Adaptado).

A SLA transformou a maneira como são projetados, produzidos e

consumidos os produtos de hoje em dia. Dela surgiram outras inúmeras tecnologias que tem como base a fabricação por meio da adição sucessiva de camadas de material, como a modelagem por deposição fundida, a sinterização seletiva por laser, entre outras (GODEC et al., 2022).

A estereolitografia em máscara é uma tecnologia derivada da SLA que trouxe melhoras significativas ao processo. O principal motivo para essa evolução está na substituição do feixe de laser UV por um conjunto de LEDs UV que, em conjunto com uma tela LCD seletivamente transparente, projetam a imagem de uma camada inteira de uma só vez, como ilustrado na figura 03. Permitindo a cura simultânea de toda a seção transversal da peça, diminuindo assim o tempo de produção (JUNK; BÄR, 2023).



## 2.2 PROJETO GENERATIVO

Atualmente, o processo de design tradicional está se tornando defasado. Ele depende exclusivamente da experiência do designer e engenheiro, é trabalhoso e, mesmo após horas de design, análise e prototipagem, a pressão por ciclos de desenvolvimento mais curtos impede que os projetos atinjam sua otimização ideal. Além disso, as mais novas gerações de produtos clamam por ultra performance, o que não é trivial de se obter por métodos tradicionais, então é

a partir dessa necessidade que surge o projeto generativo (MCKNIGHT, 2017).

O projeto generativo, também conhecido como design generativo, é um método computacional para a exploração e otimização de designs. A partir de uma ideia de design inicial, ele utiliza algoritmos para gerar múltiplas soluções, permitindo que os projetistas avaliem e selecionem alternativas que atendam a critérios de desempenho específicos (SAADI; YANG, 2023).

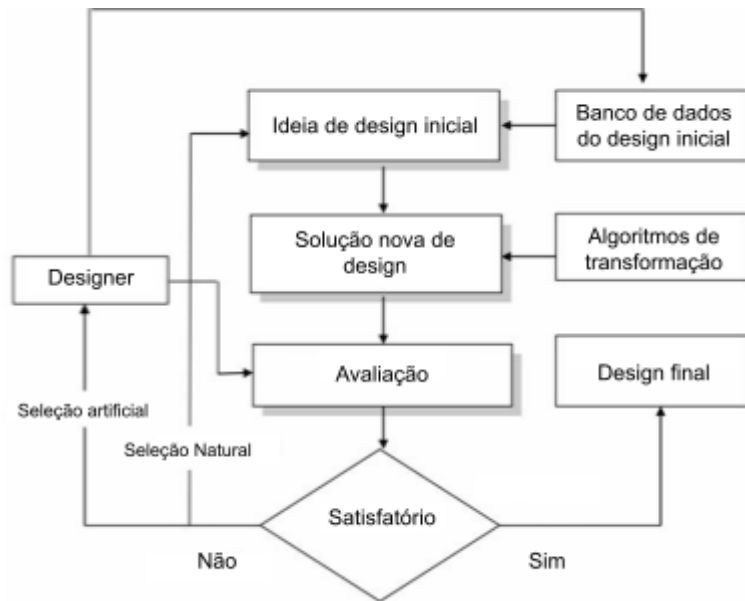
O processo inicia com a definição de parâmetros e metas para o projeto, como peso, resistência, custos, cargas e volume disponível para a peça. Em seguida, são utilizados algoritmos e inteligência artificial para geração de potenciais designs (MCKNIGHT, 2017). O processo itera através da exploração de variações até que a geração seja interrompida por critérios de avaliação predefinidos ou pela intervenção do usuário (CUI; TANG, 2017).

A forma como essas iterações se dão pode ser dividida em seleção artificial ou natural, a figura 04 ilustra esses processos. Na seleção artificial, o design é guiado predominantemente pelo usuário. Já na seleção natural, o processo envolve a avaliação automática de parâmetros que atendem, em alguma medida, as restrições matemáticas ou espaciais previamente definidas (CUI; TANG, 2017).

Durante o processo do projeto generativo milhares de designs são criados, inviabilizando que o designer avalie cada uma delas, dessa forma se faz necessário que inicialmente as iterações sejam bem espaçadas dentro do espaço de design viável. A partir disso, os parâmetros são redefinidos para um refinamento dos designs até que se obtenha um resultado satisfatório (KRISH, 2011).

A Airbus Group em conjunto com o Autodesk desenvolveram um estudo de caso em que fica notável a relevância desse tipo de método. Através do uso de algoritmos de design generativo foi possível otimizar a divisória de cabine de um Airbus A320, resultando em uma estrutura final 45% mais leve, que consome 95% menos de matéria-prima e estima-se que economize cerca de 3kg de combustível por divisória anualmente (AIRBUS GROUP, 2016).

**Figura 04** - Representação esquemática de como se dá o projeto generativo.



Fonte: CUI, Jia; TANG, Ming X.; Towards generative systems for supporting product design (2017) (Adaptada).

### 2.2.1 Otimização de topologia

Enquanto que no projeto generativo busca-se explorar múltiplas opções de design, a otimização de topologia foca na geração de apenas um único modelo otimizado, que atenda os parâmetros especificados. Ainda assim, é possível utilizar esse método como um mecanismo de exploração para encontrar um ótimo local, um conjunto de pareto em problemas de otimização multiobjetivo ou diversificar a definição de topologia de um problema de otimização (JANG; YOO; KANG, 2022).

Para tal, utilizam-se de modelos matemáticos para rearranjar o volume de material na peça, geralmente com foco em minimizar a densidade/volume de material da peça e maximizar resistência em pontos de estresse mecânico (AHMED; GUPTA, 2021).

Esse tipo de metodologia é empregada em softwares CAD (Computer-aided design), para melhora no desempenho estrutural de um componente. Nela tem-se o rearranjo de material dentro do domínio, levando em consideração condições de carregamento e contorno, o que resulta em estruturas de peso reduzido e alta eficiência mecânica (AHMED; GUPTA, 2021).

Oh e colaboradores (2018) propõem uma abordagem inovadora denominada Deep Generative Design (DGD), que integra a otimização de topologia

com modelos de deep learning para gerar múltiplos designs únicos e de alta qualidade (OH et al., 2019).

### 2.2.2 Mesoestruturas

A natureza está repleta de materiais que, ao longo da evolução, desenvolveram estruturas otimizadas às condições de estresse mecânico ao qual estes estão submetidos. Por exemplo, os ossos trabeculares, também conhecidos como ossos esponjosos, possuem estruturas porosas que se adaptaram de forma com que a espessura e orientação dessas redes é afetada pela magnitude e orientação da tensão ao qual estes são submetidos (BAUER et al., 2014) (CERUTI; FERRARI; LIVERANI, 2017) (KLADOVASILAKIS; TSONGAS; TZETZIS, 2021) (YIN et al., 2023).

Mesoestruturas, também conhecidos como sólidos celulares, são materiais compostos por células interconectadas de bordas ou faces sólidas, que preenchem um espaço. Essa configuração, conforme descrito por Gibson e Ashby (1997), permite uma ampliação da gama de propriedades dos materiais, possibilitando a criação de sólidos projetados para aplicações específicas (GIBSON; ASHBY, 1999).

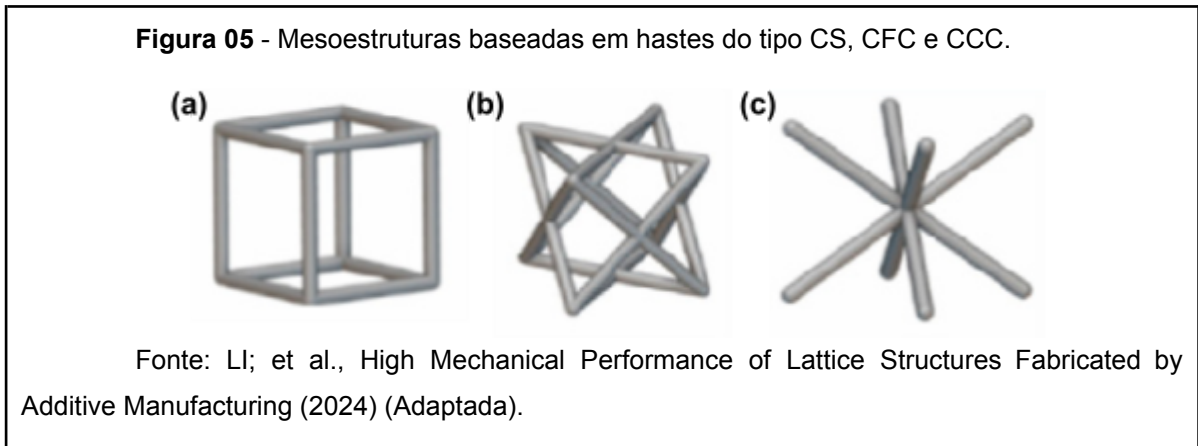
Esses sólidos podem apresentar estruturas distintas projetadas para atender diferentes necessidades, podendo ser classificados de diversas formas, como por exemplo de acordo com suas formas topológicas, podendo ser baseadas em hastes (strut-based), baseadas em superfície (surface-based), baseadas em casca (shell-based) (CHEN et al., 2021).

As mesoestruturas baseadas em hastes, como o nome sugere são formadas por uma rede interconectada e repetitiva formada de hastes, suas geometrias são geralmente baseadas em células unitárias, como CS, CFC, CCC, dentre outras, representadas na figura 05 (LI et al., 2024).

As células unitárias de mesoestruturas baseadas em hastes podem ser descritas a partir do número de hastes ( $s$ ) e nós ( $n$ ). Esses números definem o número de Maxwell ( $M$ ), de acordo com a equação 01, que descreve o comportamento mecânico da estrutura. Caso  $M < 0$ , então a mesoestrutura possui comportamento dominado por flexão, o que a faz mais flexível, e caso  $M \geq 0$ , seu

comportamento é dominado por alongamento, o que a torna mais rígida (CHEN et al., 2021).

$$M = s - 3n + 6 \text{ (Equação 01)}$$



Quanto as mesoestruturas baseadas em superfícies, também chamadas de estruturas de superfície triplamente periódicas (TPMS), são estruturas de superfície suave sem cantos ou conexões afiadas, que são projetadas a partir de equações implícitas. As TPMS foram primeiramente descritas em 1865 por Schwarz, que definiu a superfície primitiva de Schwarz e a superfície diamante de Schwarz, apresentadas na figura 06 (LI et al., 2024) (YIN et al., 2023).

Afim de modelar estruturas TPMS é necessário utilizar equações de aproximação de conjunto de nível, derivadas de uma transformada de Fourier, que extraem uma equação trigonométrica tridimensional para cada geometria na forma  $f(x, y, z) = t$ , onde  $t$  é uma constante do conjunto de nível. Por exemplo, as estruturas TPMS primitivas de Schwarz podem ser obtidas pela equação 02 (KLADOVASILAKIS et al., 2021).

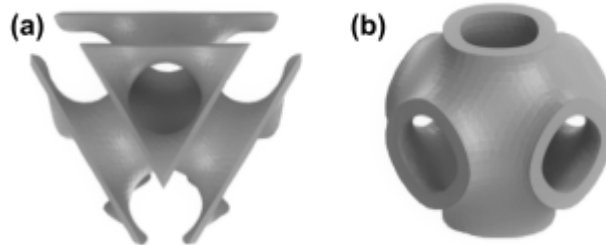
$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = t \text{ (Equação 02).}$$

Ao aplicar a operação mencionada é possível obter dois resultados distintos, aplicando valores positivos ou negativos para  $t$ , gerando ou uma estrutura esqueleto (com paredes) ou uma estrutura de planos, como mostra a figura 07 (KLADOVASILAKIS et al., 2021).

As mesoestruturas baseadas em cascas são formadas por placas, e suas geometrias são inspiradas em células unitárias de mesoestruturas baseadas em

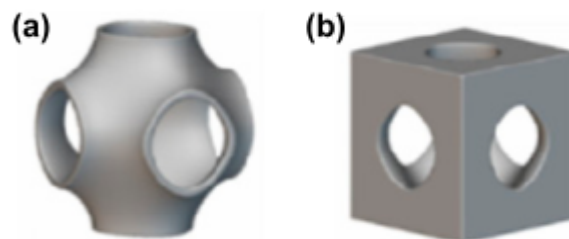
hastes, o que por sua vez acaba resultando em poros fechados, ilustrado na figura 08 (CHEN et al., 2021).

**Figura 06** - Mesoestruturas do tipo (a) TPMS Primitiva de Schwarz e (b) TPMS Diamante de Schwarz.



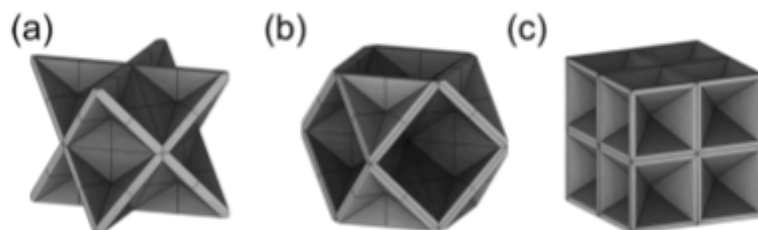
Fonte: KLADOVASILAKIS, Nikolaos; TSONGAS, Konstantinos; TZETZIS, Dimitrios; Mechanical and FEA-Assisted Characterization of Fused Filament Fabricated Triply Periodic Minimal Surface Structures (2021) (Adaptada).

**Figura 07** - Mesoestruturas TPMS Primitiva de Schwarz baseadas em (a) esqueleto (P-Skeletal) e (b) plano (P-Sheet).



Fonte: LI; et al., High Mechanical Performance of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing (2024) (Adaptada).

**Figura 08** - Mesoestruturas baseadas em cascas do tipo (a) Octeto-treliça, (b) Dodecaédrica Rômbica e (c) Cúbica com célula octaédrica.



Fonte: LI; et al., High Mechanical Performance of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing (2024) (Adaptada).

As mesoestruturas vem ganhando notoriedade nos dias atuais, devido principalmente ao desenvolvimento de tecnologias de manufatura aditiva, que tornaram possível a fabricação desse tipo de estruturas, sendo de grande interesse para os setores das indústrias aeroespacial, automotiva, engenharia biomecânica, dentre outros (KLADOVASILAKIS; TSONGAS; TZETZIS, 2021).

Em projetos onde o peso é um fator crítico, como veículos aeroespaciais, a utilização de mesoestruturas se mostra vantajosa, pois além de oferecer altos valores de resistência específica, também oferecem alta absorção de energia, alta porosidade e alta razão de área de superfície por volume, sendo interessantes para isolamento acústico e térmico (KLADOVASILAKIS; TSONGAS; TZETZIS, 2021) (BAUER et al., 2014) (YIN et al., 2023).

É demonstrado por Schaedler et al. (2011), que a partir do uso de mesoestruturas é possível criar peças que apresentam uma combinação única de propriedades, em seu estudo foram obtidos corpos com baixa densidade ( $\geq 0,9$  mg/cm<sup>3</sup>), recuperação de forma completa após compressão superior a 50% de deformação, e absorção de energia comparável à de elastômeros (SCHAEDLER et al., 2011).

### 2.3 OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA

A otimização pode ser definida como métodos utilizados para se obter o melhor resultado para um dado problema, buscando a combinação de variáveis que resultem na maximização ou minimização de uma propriedade específica do sistema em estudo. Para atingir esse objetivo, diversos métodos foram desenvolvidos, como o método univariado, o planejamento fatorial e as abordagens baseadas no simplex, como o método simplex, simplex modificado e o simplex super modificado (EIRAS; COSCIONE; CARLOS, 2018).

Dentre as estratégias de otimização, o método univariado é o mais amplamente empregado, conhecido como método clássico. Sua metodologia consiste em uma otimização sequencial, onde todas as variáveis são mantidas constantes, exceto uma. Esta variável única é então variada até atingir um valor ótimo, para então ser fixada, para que então a próxima variável seja variada, e o processo continua até que todas as variáveis sejam analisadas (CUNICO et al., 2008) (EIRAS; COSCIONE; CARLOS, 2018).

Ao contrário do método univariado, no planejamento fatorial as variáveis de interesse são investigadas de forma simultânea, o que potencializa a eficiência do processo de otimização. Nessa metodologia, são chamados de fatores as variáveis independentes e de níveis os valores ou configurações específicas que um fator pode assumir (MONTGOMERY, 2017).

O planejamento fatorial é descrito por  $b^a$  em que  $a$  representa o número de fatores analisados e  $b$  indica o número de níveis. Na tabela 01 pode se observar uma matriz de planejamento fatorial  $2^n$ , onde  $n = 3$ , ou seja, nesse exemplo temos o estudo de 3 variáveis com 2 níveis cada, resultando assim num número total de 8 combinações de experimentos (EIRAS; COSCIONE; CARLOS, 2018).

No caso de planejamentos fatoriais de 2 níveis é comum atribuir sinais de “-” e “+” para representar níveis baixos e altos respectivamente, o que auxilia na comparação e citação de dados (MONTGOMERY, 2017).

São chamados de efeitos principais a influência que cada fator tem com os resultados individualmente, e chamados de efeitos de interação a relação que dois ou mais fatores têm com os resultados de maneira simultânea (EIRAS; COSCIONE; CARLOS, 2018).

O efeito principal é obtido a partir da equação 03, onde  $y^+$  é a resposta média do fator em um nível alto,  $y^-$  é a resposta média do fator em um nível baixo,  $b$  é o número de fatores e  $a$  é o número de níveis. Quanto maior o módulo do efeito principal, maior a influência desse fator nas respostas, e quando próximo a zero, há pouca ou nenhuma influência (EIRAS; COSCIONE; CARLOS, 2018).

$$EP = \frac{2(\sum y^+ - \sum y^-)}{b^a} \text{ (Equação 03);}$$

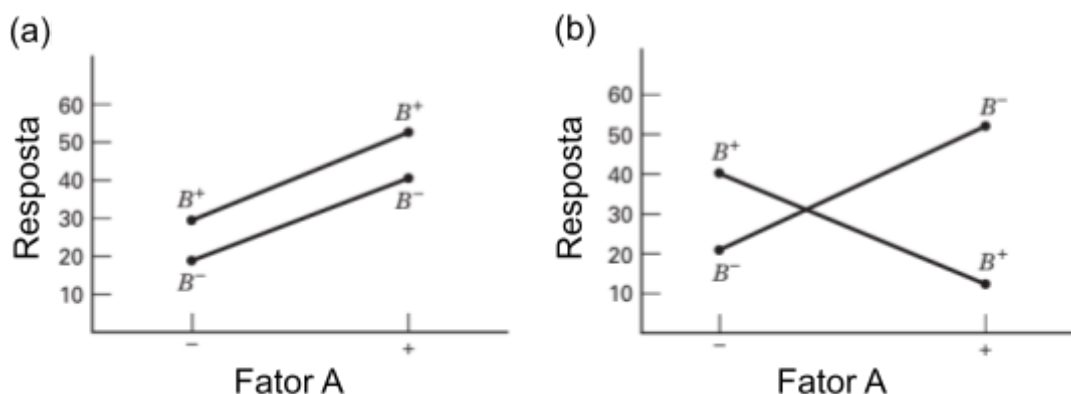
**Tabela 01** - Exemplo de matriz de planejamento fatorial 2<sup>o</sup>.

Variáveis				Nível baixo	Nível alto	
Temperatura (T), °C				160 (-)	180 (+)	
Concentração (C), %				20 (-)	40 (+)	
Catalisador, (K)				A (-)	B (+)	
				Replicatas		
exp,y	T	C	K	Primeira	Segunda	Média
1	-	-	-	59	61	60
2	+	-	-	74	70	72
3	-	+	-	50	58	54
4	+	+	-	69	67	68
5	-	-	+	50	54	52
6	+	-	+	81	85	83
7	-	+	+	46	44	45
8	+	+	+	79	81	80

Fonte: EIRAS; et al., Métodos de Otimização em Química (2018).

O efeito de interação pode ser analisado de maneira qualitativa através do uso de gráficos, assim como ilustrado na figura 09. Caso o efeito de um fator seja o mesmo em todos os níveis de outro fator, dizemos que não há interação significativa, como indicado na figura 09 (a) onde há um certo grau de paralelismo entre as respostas (linhas  $B^+$  e  $B^-$ ). Caso contrário, temos então interação significativa, como indicado na figura 09 (b) pela interseção das respostas (MONTGOMERY, 2017).

**Figura 09** - Gráficos de interação entre fator A e B, onde (a) não há efeitos de interação e (b) há efeitos de interação.



Fonte: MONTGOMERY, Douglas C., Design and Analysis of Experiments (2012).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e métodos utilizados no trabalho, detalhando o planejamento experimental, os softwares e equipamentos empregados na fabricação dos corpos de prova, os ensaios realizados e os softwares de estatística e simulação.

#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Diante da natureza das mesoestruturas e como o objetivo da pesquisa envolve a otimização de propriedades mecânicas, o planejamento fatorial  $2^k$  demonstrou ser a melhor escolha para o estudo. Sendo possível identificar quais dos fatores estudados mais influenciam nas propriedades mecânicas da peça e mapear as interações entre eles.

Foi determinado que a mesoestrutura a ser estudada seria a TPMS Primitiva de Schwarz, por conta da possibilidade de variar diversos parâmetros como o tipo, podendo ser baseada em esqueleto (P-Skeletal) ou plano (P-Sheet), o tamanho de aresta da célula, que nesse caso variou entre 5 a 7mm, o ângulo de inclinação da célula em relação ao apoio, variando entre  $0^\circ$  e  $45^\circ$  e a razão de diâmetro interno e aresta da célula (que será chamado de densidade celular) , tendo variado entre 1,4 e 1,75.

A tabela 02 apresenta o planejamento experimental adotado com a identificação das amostras.

ID	Tipo de estrutura		Tamanho de aresta na célula (mm)		Densidade celular		Inclinação (°)	
	P-Sheet (-)	P-Skeletal (+)	5 (-)	7 (+)	1.4 (-)	1.75 (+)	0 (-)	45 (+)
CP01		(-)		(-)		(-)		(-)
CP02		(-)		(-)		(-)		(+)
CP03		(-)		(-)		(+)		(-)
CP04		(-)		(-)		(+)		(+)
CP05		(-)		(+)		(-)		(-)
CP06		(-)		(+)		(-)		(+)
CP07		(-)		(+)		(+)		(-)
CP08		(-)		(+)		(+)		(+)
CP09		(+)		(-)		(-)		(-)
CP10		(+)		(-)		(-)		(+)
CP11		(+)		(-)		(+)		(-)
CP12		(+)		(-)		(+)		(+)
CP13		(+)		(+)		(-)		(-)
CP14		(+)		(+)		(-)		(+)
CP15		(+)		(+)		(+)		(-)
CP16		(+)		(+)		(+)		(+)

### 3.2 MATERIAIS

Para a produção dos corpos de prova, foi adquirida e utilizada a resina fotopolimérica Anycubic Standard Resin cinza, sua composição é baseada principalmente em acrilatos, sendo eles poli-epsilon-caprolactona acrilada, diacrilato de dietilenoglicol, diacrilato de trietilenoglicol, acrilatos de pentaeritritol, e um fotoiniciador, TPO-L (ethyl phenyl[2,4,6-trimethylbenzoyl]phosphinate) (ANYCUBIC, 2023).

Como a resina foi definida como uma constante, sua escolha se deu ao acaso, uma vez que o interesse do estudo está na avaliação de efeito dos parâmetros geométricos para otimização da mesoestrutura.

Para a limpeza dos corpos de prova após a impressão, foi utilizado álcool isopropílico 70% para remover o excesso de resina não curada.

### 3.3 MÉTODOS E INSTRUMENTAÇÃO

Nesta seção é descrito os métodos empregados para a produção dos corpos de prova, os instrumentos utilizados para os ensaios, e os softwares de estatística (para análise multivariada) e simulação (para análise de elementos

finitos e otimização de topologia).

### 3.3.1 Produção dos corpos de prova

Para a modelagem dos corpos de prova foi utilizado o software SolidWorks® versão estudantil, disponibilizado pela instituição de ensino. Esta versão oferece acesso às principais ferramentas de modelagem e simulação, sendo adequada para fins acadêmicos e não comerciais.

Os modelos dos corpos de prova foram produzidos seguindo o fluxograma apresentado na figura 10, onde inicialmente foram modeladas as células unitárias, apresentadas na figura 11, seguindo os parâmetros pré estabelecidos anteriormente no planejamento experimental (tabela 02).

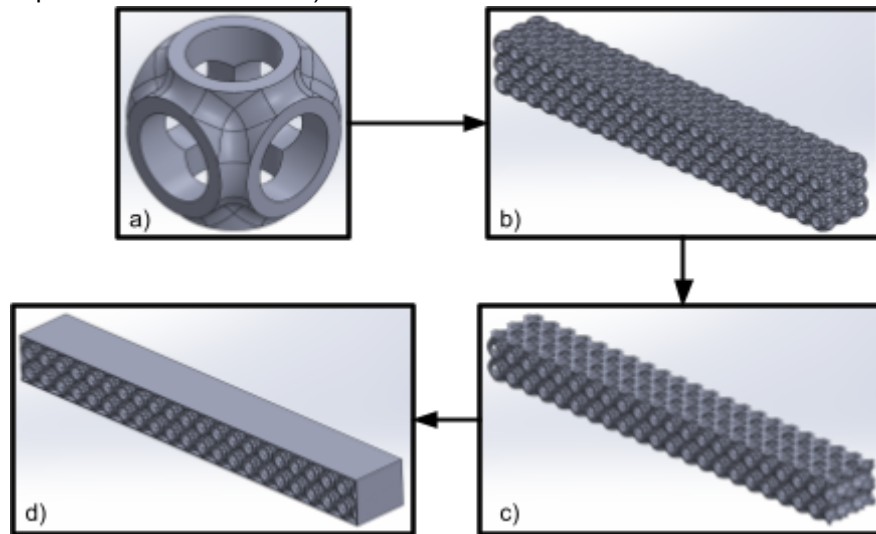
A partir destes modelos foram produzidos os corpos de prova utilizando recursos de padrão linear para repetição dos corpos, que foram fundidos e recortados a fim de atingirem as dimensões de 15x20x150mm.

Este tamanho para os corpos de prova garantem que haja pelo menos 2 células unitárias presentes no núcleo do corpo de prova, assegurando que o comportamento das células unitárias permitam mobilidade e rigidez tridimensional.

Foram ainda adicionadas faces de 1mm de espessura na parte superior e inferior dos corpos, para que a ponteira do teste de flexão e os apoios tenham superfície de contato. Como também, foram adicionados lateralmente faces de 0,1mm de espessura para auxiliar na produção e retirada dos corpos de prova.

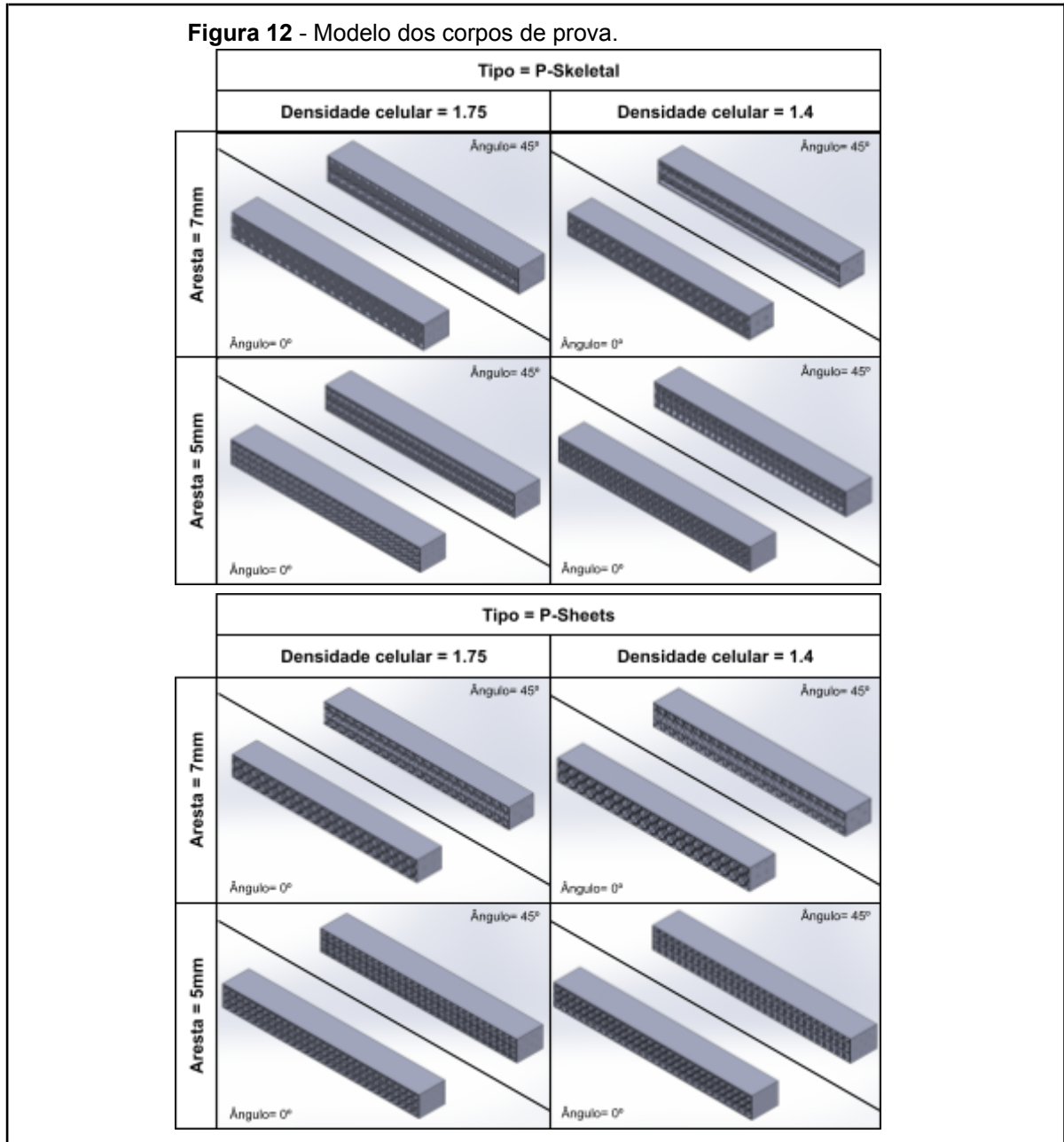
Seguindo o fluxograma citado e o planejamento experimental foram produzidos um total de 16 corpos de prova que constam na figura 12.

**Figura 10** - Fluxograma de modelagem dos corpos de prova, onde temos a) a modelagem da célula unitária, (b) utilização de recurso de padrão linear para repetição da célula, c) recorte para as dimensões desejadas e d) adição de superfícies de apoio (tanto para produção dos corpos quanto para o ensaio de flexão).



**Figura 11** - Modelo das células unitárias.

		Tipo = P-Skeletal		Tipo = P-Sheet	
		Densidade celular = 1.75	Densidade celular = 1.4	Densidade celular = 1.75	Densidade celular = 1.4
Aresta = 7mm					
	Aresta = 5mm				



### 3.3.2 Fatiamento dos Corpos de Prova

Os modelos sólidos dos corpos de prova foram convertidos em arquivos STL, para uso no software de fatiamento Halot Box™. Esta conversão foi realizada utilizando as configurações de alta resolução (baixa tolerância de desvio e angular) para assegurar a fidelidade da geometria da malha.

Os modelos foram posicionados de forma com que as faces laterais fossem utilizadas de base para a produção e por conta da geometria não houve necessidade de utilização de suportes. Desta forma, foram então feitos os arquivos

de produção por meio do fatiamento dos corpos de acordo com os parâmetros de configuração de impressão, que constam na tabela 03.

**Tabela 03** - Parâmetros de configuração de impressão utilizados.

Impressora	Halot One
Espessura de camada (mm)	0,05
Altura ascendente (mm)	6
Velocidade do motor (mm/s)	2
Light off Delay (s)	4
Tempo de Exposição (s)	3
Exposição Inicial (s)	70
Bottom Layer Count	5

### 3.3.3 Produção dos Corpos de Prova

A impressão dos arquivos foi feita por mSLA na impressora 3D Creality Halot One (figura 13), disponibilizada para uso no presente trabalho pela Zirconium Equipamentos Tecnológicos, com resina Anycubic Standard cinza, também disponibilizada pela mesma.

Após conclusão da impressão, as peças foram retiradas da plataforma e lavadas em álcool isopropílico 70% para remoção do excesso de resina não polimerizada e levadas para ambiente escuro até a realização dos ensaios para evitar cura excedente dos corpos que poderia afetar as propriedades mecânicas analisadas.

**Figura 13** - Impressora 3D Creality Halot One.



### 3.3.4 Ensaio de flexão de 3 pontos

Para a avaliação das propriedades mecânicas das estruturas analisadas, foi determinado que seriam realizados ensaios de flexão de 3 pontos, comum em estudos de mesoestrutura (SHAMIM, 2024). Para tal, foi utilizada uma máquina de teste universal disponibilizada pela Zirconium Equipamentos Tecnológicos para a pesquisa, vide figura 14.

**Figura 14** - Máquina de teste universal.



O ensaio foi realizado de acordo com a norma ASTM D790, que descreve

o método de teste padrão para determinar as propriedades de flexão de materiais plásticos. Esse ensaio consiste em posicionar o corpo de prova sobre dois apoios paralelos e cilíndricos, uma ponteira aplica uma carga controlada centralmente entre estes apoios e o ensaio é finalizado quando ocorre ruptura ou deformação excessiva da peça.

Os dados coletados pelo equipamento, durante o ensaio, são a carga aplicada ( $F$ ) e a deflexão ( $\delta$ ), e a partir destes dados é possível calcular a resistência à flexão ( $\sigma_F$ ) de um corpo de seção transversal retangular, que é o caso dos corpos analisados, de acordo com a equação 04.

$$\sigma_F = \frac{3FL}{2wh^2} \text{ (Equação 04);}$$

Onde  $F$  é a força aplicada no momento de ruptura,  $L$  é a distância entre os pontos de apoio,  $w$  é a largura do corpo e  $h$  é a espessura (ou altura) do corpo.

É possível ainda calcular o módulo de flexão ( $E_F$ ) de um corpo de seção transversal retangular a partir da equação 05.

$$E_F = \frac{FL^3}{4wh^3\delta} \text{ (Equação 05);}$$

Para realização de cálculo da resistência e módulo de flexão foi utilizado o software Google Sheets<sup>®</sup>, um software de planilha eletrônica de acesso gratuito.

### 3.3.5 Software de estatística

Como as mesoestruturas são compostas predominantemente de vazios em seu volume, é de se esperar que sua resistência mecânica seja inferior a uma peça maciça. Sendo assim, para fins comparativos foram calculadas as densidades relativas referentes a cada uma das células unitárias.

Através do Solidworks foi possível obter o volume dos modelos dos corpos de prova, a partir do uso de ferramentas de medição. Os valores fornecidos foram tabelados e usados para o cálculo de densidade relativa (tabela 04) por meio

da equação 06, onde  $V_s$  é o volume da estrutura,  $V_t$  é o volume total do sólido e  $\rho_r$  é a densidade relativa.

$$\rho_r = \frac{V_s}{V_t} \text{ (Equação 06);}$$

Em seguida, esses valores foram utilizados para o cálculo da resistência à flexão relativa,  $\sigma_{fr}$ , de acordo com a equação 07, onde  $\sigma_f$  é a resistência à flexão e  $\rho_r$  é a densidade relativa.

$$\sigma_{fr} = \frac{\sigma_f}{\rho_r} \text{ (Equação 06);}$$

**Tabela 04** - Valores de densidade relativa de acordo com tipo e densidade celular.

Tipo	Densidade Celular	Densidade Relativa
P-Skeletal	1,4	0,3132
P-Skeletal	1,75	0,4945
P-Sheet	1,4	0,1036
P-Sheet	1,75	0,2848

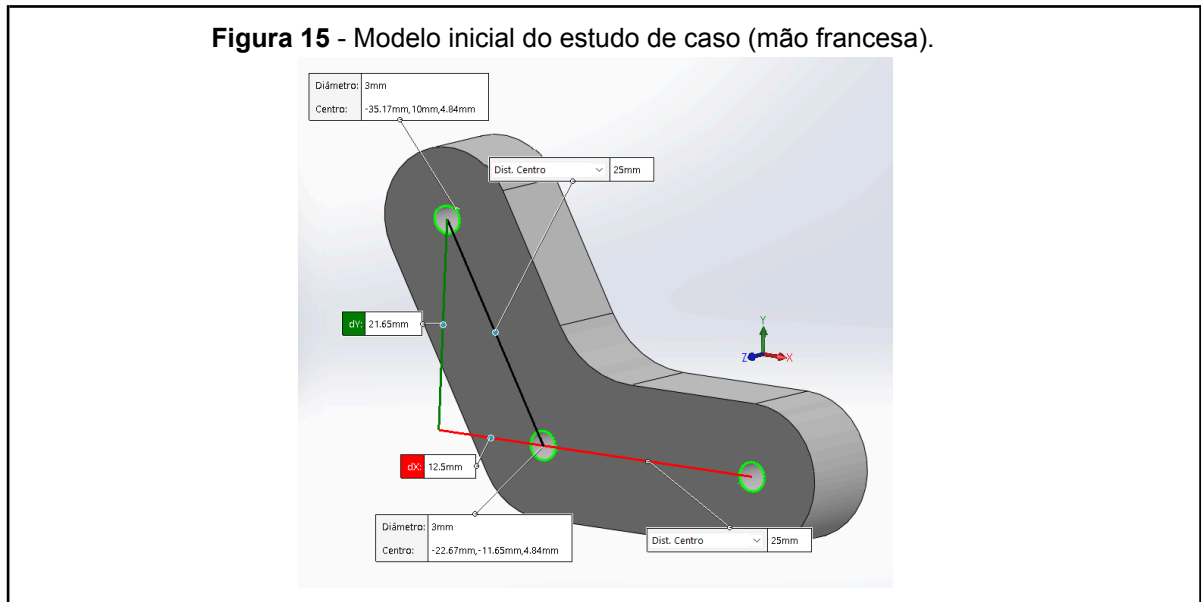
Para o processamento e análise dos dados de resistência à flexão, massa e resistência à flexão relativa coletados, foi empregado o software MiniTab Statistical Software®. Foram utilizados os recursos de estatística descritiva para cálculo de média e desvio padrão, análise de normalidade, para verificação de distribuição e aplicação de testes de inferência como teste T e teste Q para avaliação de outliers.

Outro recurso utilizado do software foi referente a análise de experimentos fatoriais, para avaliação de efeitos primários e de interação, geração de gráficos de sobreposição e diagrama de contorno, além de otimização dos fatores avaliados.

### 3.3.6 Estudo de Caso

O estudo de caso foca na otimização de uma mão francesa (suporte

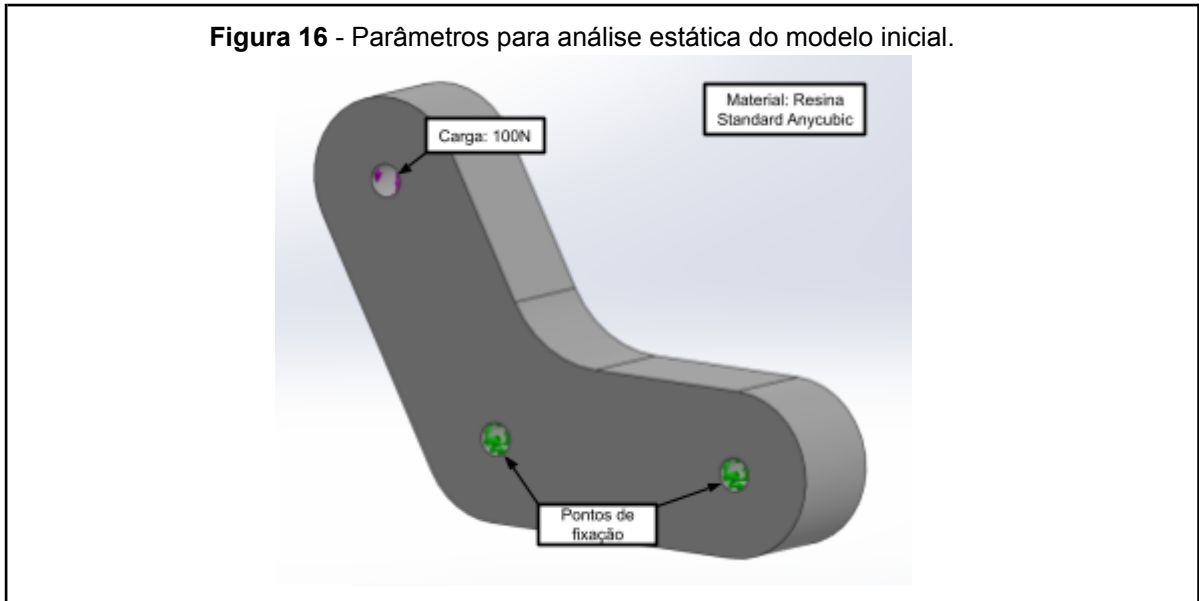
angular), um componente amplamente utilizado em estruturas civis e mecânicas, a partir do uso conjunto de otimização de topologia e aproveitamento de espaço negativo com mesoestruturas. Para tal, inicialmente foi feita a modelagem da peça a partir do Solidworks, ilustrada na figura 15, apresentando 10,44g de massa.



Em seguida foi utilizado o módulo Solidworks Simulation, uma extensão do software Solidworks para estudo de elementos finitos, para análise estática e otimização de topologia.

Primeiramente, foi feita uma simulação de análise estática da peça inicial, a fim de comparar o comportamento da peça antes e depois da otimização, os parâmetros aplicados para o estudo seguem na figura 16.

**Figura 16** - Parâmetros para análise estática do modelo inicial.



Posteriormente, foi feita a otimização de topologia da peça inicial, tendo sido aplicado os mesmo parâmetros utilizados na simulação anterior, acrescentando restrições de regiões a serem preservadas, no caso os furos de encaixe da peça, e definindo como meta atingir a melhor taxa de rigidez para peso, reduzindo a massa em até 90%, com tensão não podendo ultrapassar 85% do valor do limite de escoamento.

Os vazios gerados na peça foram então preenchidos com a mesoestrutura avaliada como ótima, para a produção do design híbrido, para isso foram utilizados recursos de padrão linear e operações booleanas, como interseção e união de corpos. Além disso, também foram adicionadas superfícies de contorno da peça, com medida de  $1mm$ .

Por fim, foi realizada uma simulação para comparar a performance da peça inicial e final sob estresse, seguindo os mesmos parâmetros pré estabelecidos.

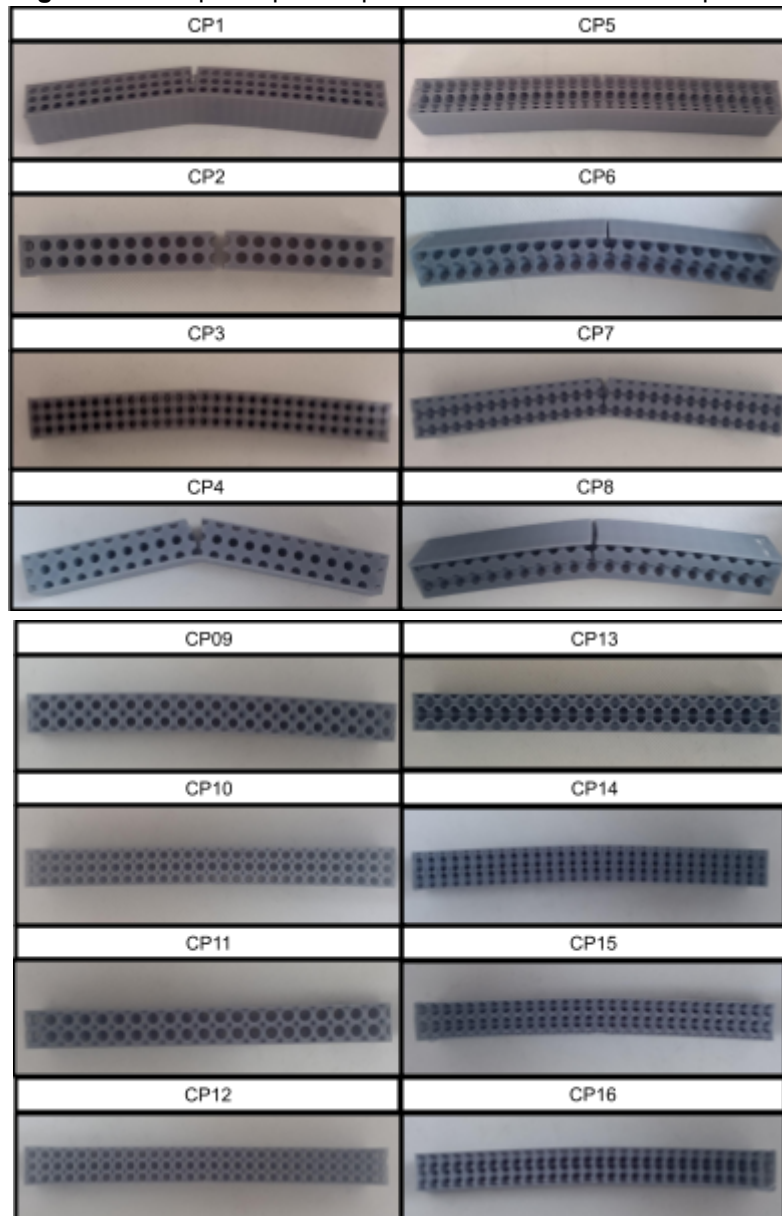
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute os resultados da pesquisa, obtidos a partir da análise de dados experimentais e simulação. Sendo utilizado o Minitab, para cálculos envolvendo estatística descritiva, teste de normalidade e teste Q. Além disso, também foram feitas análises multivariadas dos parâmetros de mesoestrutura por meio de gráficos fatoriais, diagramas de contorno e gráficos de sobreposição, servindo como base para a otimização.

### 4.1 ENSAIOS DE FLEXÃO DE TRÊS PONTOS

Todos os testes realizados foram concluídos com êxito, ou seja, houve ruptura de todos os corpos de prova, sendo assim possível o cálculo de resistência das peças. Foram registradas imagens dos corpos de prova pós ensaios de flexão, vide figura 17.

**Figura 17 - Corpo de prova após ensaio de flexão de três pontos.**



#### 4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A partir dos dados coletados nos ensaios de flexão, foi avaliada a resistência à flexão, massa e resistência aparente apresentada pelos corpos de prova por estatística descritiva, por meio do Minitab. A tabela 04 apresenta os valores de média, erro padrão da média, desvio padrão, variância, coeficiente de variância, valores mínimos e máximos e a amplitude dos dados.

Variável	Média	EP da Média	Desvio Padrão	Variância	Coef. Var.
Resistência à Flexão (MPa)	1,909	0,392	1,566	2,453	82,03
Massa (g)	21,66	2,26	9,05	81,82	41,76
Resistência Rel. (MPa)	5,473	0,813	3,251	10,571	59,4

A resistência à flexão média obtida foi de 1,909 MPa, um valor consideravelmente inferior ao de peças totalmente densas, que varia de 40 a 50MPa de acordo com o fabricante da resina. E quando é levado em conta a presença de vazios na peça o valor de resistência médio sobe para 5,473MPa.

Em outras palavras, quando é comparado o valor de resistência fornecido pelo fabricante com a resistência relativa média dos corpos de prova, nota-se que ao reduzir cerca de 70% da densidade dos corpos, obteve-se uma redução de 87,83% da resistência relativa.

O erro padrão dos resultados é de 0,39MPa para o valor médio da resistência à flexão, 2,26g para a massa e 0,813MPa para o valor a resistência relativa, o que pode indicar que há uma grande dispersão dos dados, confirmado pelo coeficiente de variação que é de 82,03%, 41,76% e 59,40% e respectivamente para cada uma das médias.

Esse tipo de comportamento já é de se esperar, uma vez que a variação de parâmetros foi realizada a fim de obter resultados que expressem uma mudança de comportamento de acordo.

#### 4.3 TESTE DE NORMALIDADE (RYAN-JOINER)

A fim de verificar se os dados seguem uma distribuição normal foi realizado o teste de normalidade de Ryan Joiner, com auxílio do Minitab. Onde verifica-se a validade da hipótese nula (a amostragem segue uma distribuição normal), para isso é realizado o cálculo dos escores de normalidade esperados para os dados. Estes são os valores que a amostra teria se fosse perfeitamente extraída de uma distribuição normal.

Em seguida, calcula-se o coeficiente de correlação ( $R$ ) entre os seus dados reais (ordenados) e os escores de normalidade esperados. Caso os seus dados estiverem próximos de uma distribuição normal, o coeficiente  $R$  será próximo de 1, indicando alta correlação.

Com o valor de  $R$  o software calcula o valor de  $p$ , que em caso desse valor ser maior que o nível de significância estabelecido é possível afirmar que os dados seguem uma distribuição.

Sendo assim, considerando uma significância de 10% (0,10), os resultados indicaram que a resistência à flexão, a massa e a resistência aparente seguem uma distribuição normal, uma vez que os valores de  $p > 0.05$  como visto na tabela 05.

Variável	Média	Desvio Padrão	R	p
Resistência à Flexão (MPa)	1,909	1,566	0,951	0,093
Massa (g)	21,66	9,05	0,955	>0,1
Resistência Relativa (MPa)	5,473	3,251	0,976	>0,1

#### 4.4 TESTE DE GRUBBS (TESTE Q)

A fim de verificar a presença de outliers (valores atípicos ou discrepantes) na amostragem, foi realizado o teste de Grubbs, por meio do Minitab, nele suponha-se como hipótese nula que todos os valores de dados são provenientes da mesma população normal, e como hipótese alternativa que o menor ou o maior valor dos dados é um outlier.

Para verificar a validade da hipótese nula é calculado a estatística de teste de Grubbs ( $G$ ), que é baseada no desvio do valor mais extremo em relação à média, dividido pelo desvio-padrão. O valor de  $G$  é então comparado com  $G_{crítico}$ , um valor retirado da tabela de Grubbs associado ao nível de confiabilidade adotado. Caso  $G > G_{crítico}$ , a hipótese nula é rejeitada e aceita-se a hipótese alternativa.

Com isso vemos, com 95% de confiabilidade, na tabela 06, que os valores mínimos e máximos para resistência à flexão, massa e resistência aparente não são outliers, uma vez que,  $G < G_{crítico}$ , onde  $G_{crítico} \approx 2,78$ .

**Tabela 06** - Teste de Grubbs para (a) resistência à flexão,(b) massa e (c) resistência aparente.

Variável	Média	DesvPad	G
Resistência à flexão (MPa)	1,909	1,566	1,71
Massa (g)	21,66	9,05	1,39
Resistência Relativa (MPa)	5,473	3,251	1,84

#### 4.5 ANÁLISE DE EFEITOS

Para a avaliação dos efeitos principais e de interação, foram utilizados gráficos fatoriais, que permitem a visualização da magnitude e direção do efeito de cada fator nas respostas, e diagrama de pareto para identificar e ranquear os efeitos de cada fator e interação.

Sabe-se que, ao analisar os gráficos fatoriais dos efeitos principais, deve-se atentar ao coeficiente angular da reta que relaciona cada fator e resposta, quanto mais próximo de 0° o ângulo de inclinação, menor o efeito, e quanto mais próximo a 90° maior o efeito.

Já para a análise do gráfico de pareto, um fator é considerado significativo no estudo caso o valor de efeito ultrapasse a linha de referência, que é calculada com base no nível de significância, sendo nesse caso 0,05.

Dessa forma, ao analisarmos os gráficos na figura 18, nota-se que o tipo de mesoestrutura é o fator que mais impactou a resistência a flexão, massa e resistência relativa. Esse tipo de comportamento já era de se esperar devido às diferenças geométricas e de massa. Esse resultado é ainda reforçado pelos gráficos de pareto, na figura 22, uma vez que o valor do efeito é superior à linha de referência. Dentre os níveis estudados, as estruturas tipo esqueleto apresentaram valores superiores para todas as respostas.

Ainda analisando os gráficos fatoriais da figura 18, vemos que a densidade celular possui uma inclinação significativa para a massa, o que pode indicar significância, sendo essa afirmação reforçada pelo gráfico de pareto (figura 22), onde o efeito ultrapassa a linha de referência.

Temos também uma inclinação significativa no efeito da densidade celular para a resistência a flexão, contudo essa informação é confrontada ao analisarmos o efeito desse fator no gráfico de pareto (figura 22) que ainda que com um valor muito próximo a linha de referência para resistência à flexão, não a ultrapassa.

Contudo, como dito anteriormente, o erro padrão possui valor expressivo, dessa forma a fim de entender melhor o seu comportamento, seria de interesse reproduzir mais estudos com foco nesse fator.

O tamanho de aresta (célula unitária) não apresentou resultados significativos para ambos os gráficos, sendo assim, insignificante para otimização, bem como o ângulo de inclinação

Ao analisarmos os gráficos de interação em relação a resistência à flexão, figura 19, vemos que a maioria das retas são paralelas, indicando pouca ou nenhum efeito significativo. Sendo a única exceção a relação tamanho de aresta com densidade celular, que ainda que não se cruzem não apresentam paralelismo, contudo ao compararmos essa resposta com o gráfico de pareto (figura 22) nota-se que essa interação não possui efeito significativo para a resistência à flexão.

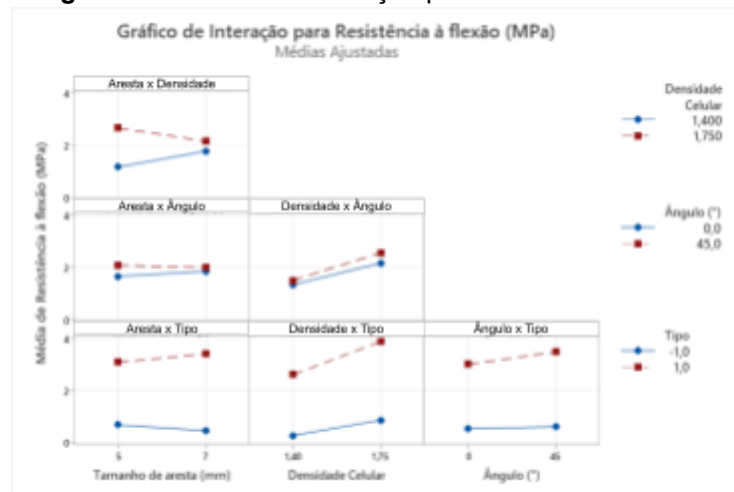
Quanto aos gráficos de interação em relação a massa na figura 20, vemos uma sobreposição das retas em dois casos e paralelismo nos demais, o que indica que nenhuma das interações apresenta efeito significativo, o que é reforçado no gráfico de pareto (figura 22).

No caso do gráfico de interação em relação a resistência à flexão relativa na figura 21, destacam-se as interações entre, tamanho de aresta e densidade celular, tamanho de aresta e ângulo de inclinação, tamanho de aresta e tipo, pela ausência de paralelismo e em alguns casos interseção das retas, o que pode indicar efeito significativo dessas interações. Porém, ao verificar o gráfico de pareto (figura 22), essa hipótese é descartada devido as retas não ultrapassarem a linha de referência.

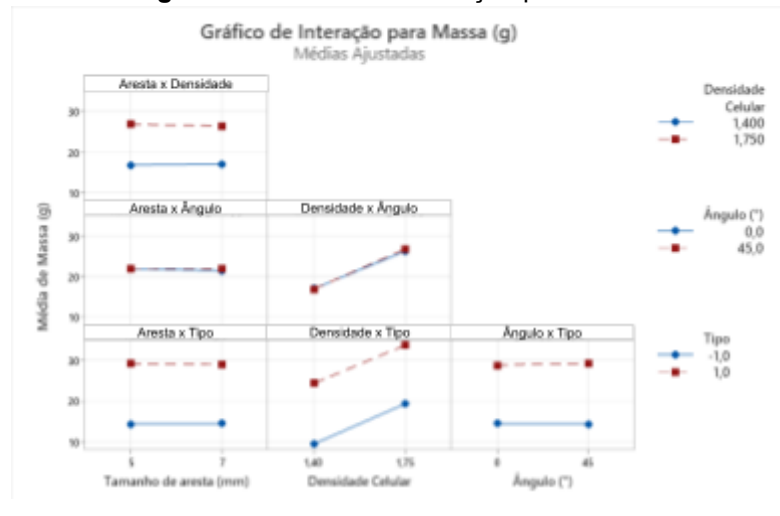
**Figura 18** - Gráfico de efeitos principais para resistência à flexão, massa e resistência aparente.



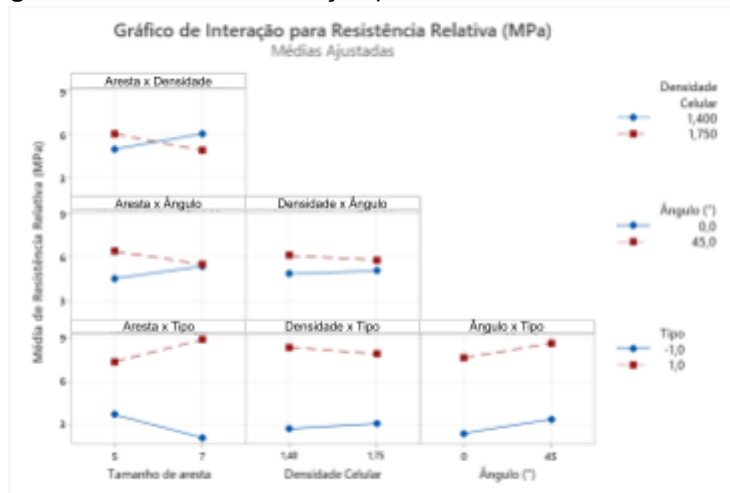
**Figura 19** - Gráfico de interação para resistência à flexão.



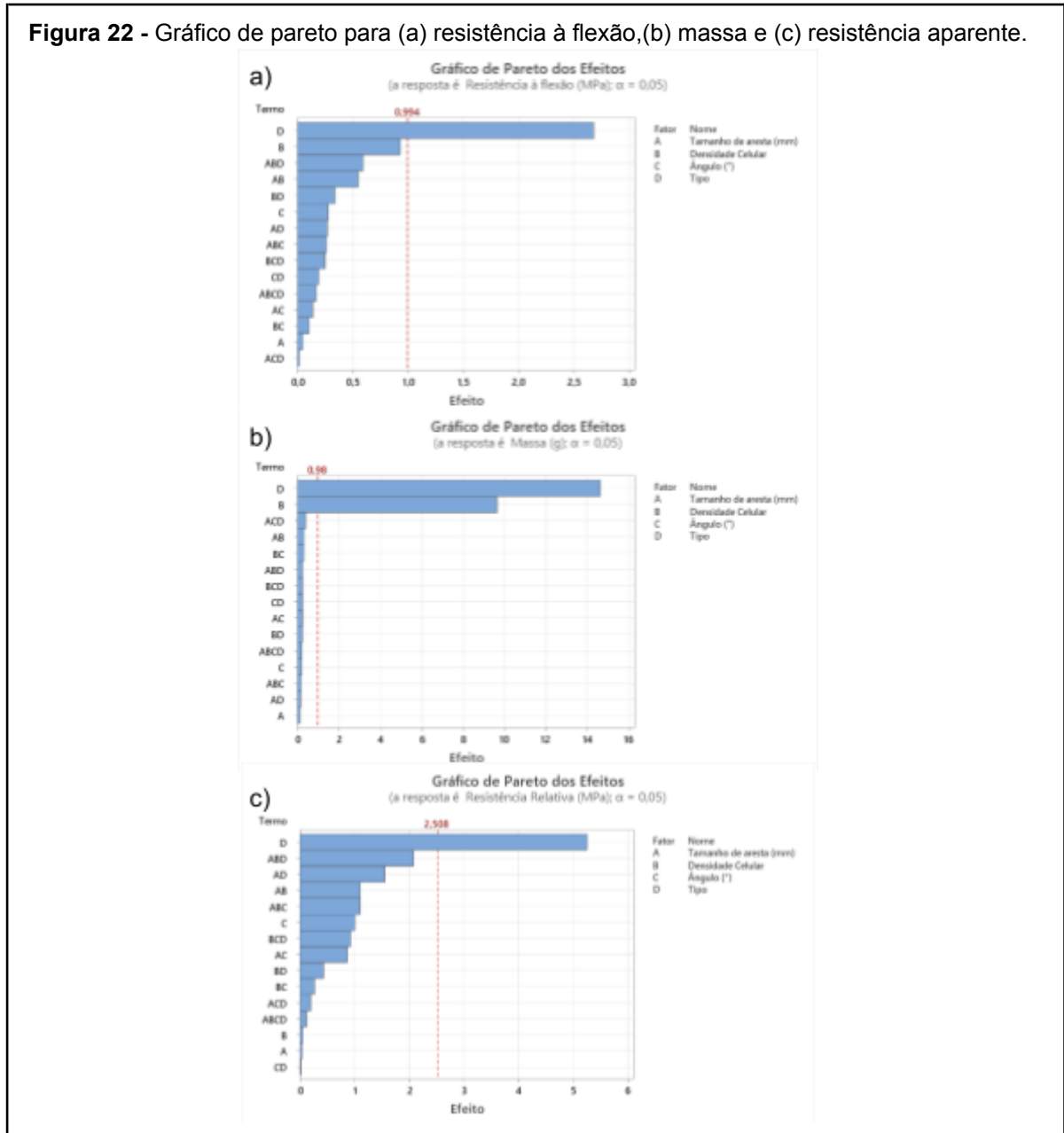
**Figura 20 - Gráfico de interação para massa.**



**Figura 21 - Gráfico de interação para resistência à flexão relativa.**



**Figura 22** - Gráfico de Pareto para (a) resistência à flexão, (b) massa e (c) resistência aparente.



#### 4.6 OTIMIZAÇÃO DE PARÂMETROS

Foi utilizado o Minitab para a avaliação de parâmetros ótimos da mesoestrutura, para isso foram determinadas metas de maximização de resistência à flexão e resistência a flexão relativa e minimização de massa. Não foram selecionados pesos e importância para as metas, tendo assim todas o mesmo valor.

Como resultado tem-se que a mesoestrutura otimizada é a referente ao CP13, com tipo P-Skeletal, tamanho de aresta de 7mm, densidade celular de 1,4 e inclinação de 0°.

## 4.7 OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA

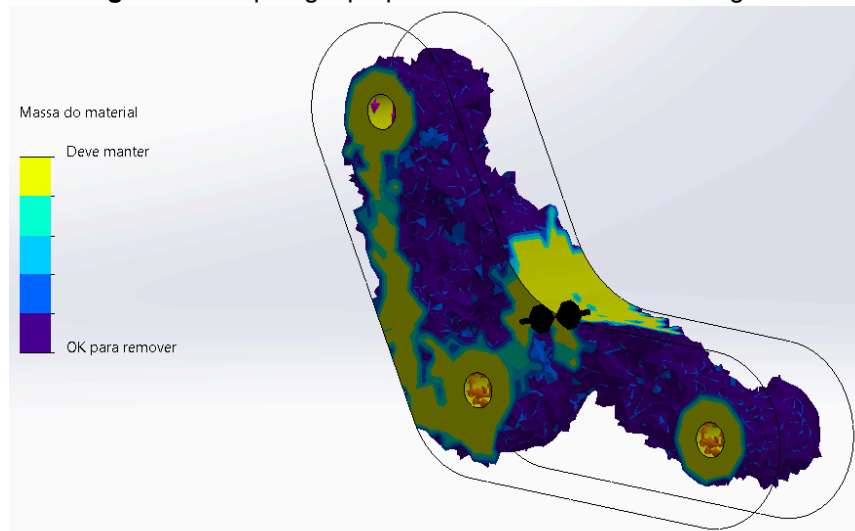
A simulação de otimização de topologia feita no Solidworks gerou um gráfico (figura 23), que indica as regiões que podem ser removidas do corpo sem causar interferência significativa na resistência estrutural, dadas as condições de carregamento.



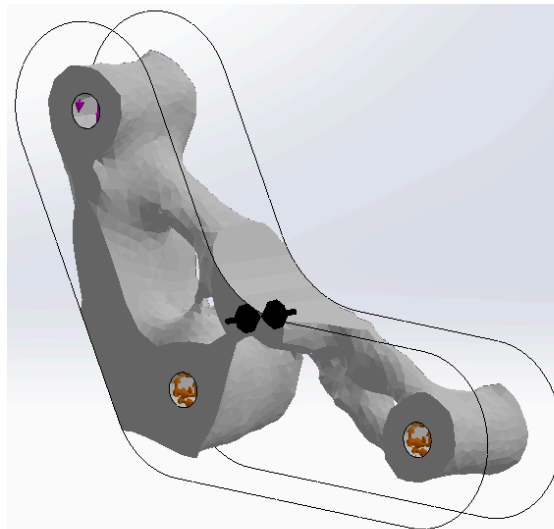
A partir deste resultado é possível gerar modelos com 100 a 19% da massa do modelo inicial, tendo sido selecionado o modelo com 25% da massa original para dar prosseguimento com o estudo. Essa escolha foi feita com base na baixa conectividade entre os pontos de apoio para as massas inferiores.

O modelo foi então suavizado pelo programa, obtendo o modelo da figura 25, que possui 3,82g , uma redução expressiva de 63,40% do valor inicial de 10,44g. Por conta da suavização do modelo é esperado que o valor não atinja 75%.

**Figura 24** - Topologia proposta com 25% da massa original.



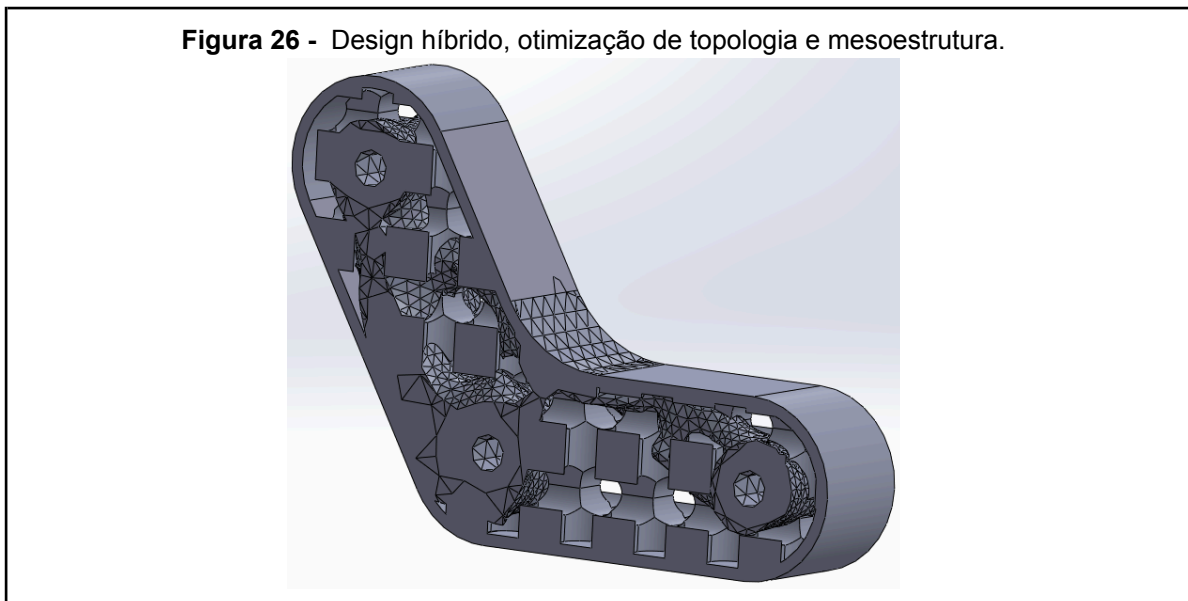
**Figura 25** - Modelo com otimização de topologia suavizada.



#### 4.8 OTIMIZAÇÃO DE TOPOLOGIA COM MESOESTRUTURA

A partir do modelo produzido por otimização de topologia, são preenchidos os vazios com a mesoestrutura otimizada por meio de operações booleanas, de interseção e união de corpos, resultando no design híbrido da figura 26. Tendo massa total como 7,19g, que quando comparado com o modelo inicial que possui 10,44g, tem-se uma redução de 31,13% da massa.

**Figura 26** - Design híbrido, otimização de topologia e mesoestrutura.



#### 4.9 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO DE ANÁLISE ESTÁTICA

Os resultados das simulações feitas no Solidworks, estão presentes nas figuras 27 a 32, onde temos os resultados de tensão de Von Mises, deslocamento e deformação do modelo inicial e do design híbrido respectivamente, todos com escala real de deformação.

De acordo com as simulações, ao analisarmos os resultados de tensão de Von Mises, ilustrados nas figuras 27 e 30, temos valores máximos de 9,52MPa e 22,08MPa, para o modelo inicial e o design híbrido respectivamente. Contudo, esses valores podem não se tratar de valores representativos, uma vez que existe a possibilidade de se tratarem de outliers. Para uma melhor precisão desses valores, seria necessário utilizar de uma malha mais fina, contudo devido às limitações de software e hardware isso não seria possível.

Presume-se então que os valores máximos de tensão real são inferiores aos simulados, que por si só já são inferiores ao limite de escoamento, o que indica que ambas as peças resistem às condições de carregamento. E ao comparar as figuras 27 e 30, nota-se que o design híbrido apresenta mais áreas verdes, o que indica uma maior concentração de tensão na peça. Esse comportamento é esperado devido a redução da massa.

Ao analisarmos o deslocamento, de acordo com a simulação o modelo inicial apresentou um deslocamento de 6,18mm enquanto que o design híbrido

apresentou um deslocamento de 10,28mm, um aumento de 66,34%. Novamente esses valores não necessariamente se tratam de valores representativos, mas de forma geral nos indicam que a redução de massa acabou contribuindo com uma piora nas propriedades mecânicas.

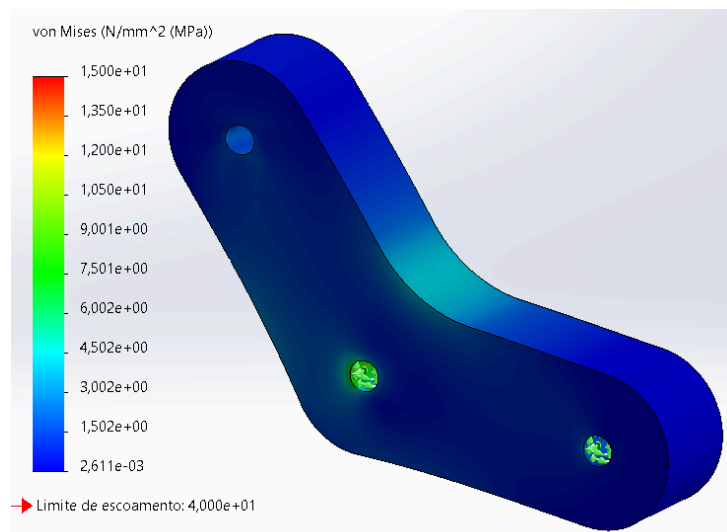
Ao analisarmos os resultados referentes a deformação das peças, ilustrado nas figuras 29 e 32, temos que os valores de deformação máxima são de 0,15 e 0,32 para o modelo inicial e modelo híbrido, um aumento de 113,33%. Vemos que, em ambos os casos, a deformação se concentrou principalmente no ponto de apoio fixo mais próximo ao ponto onde foi aplicado a carga.

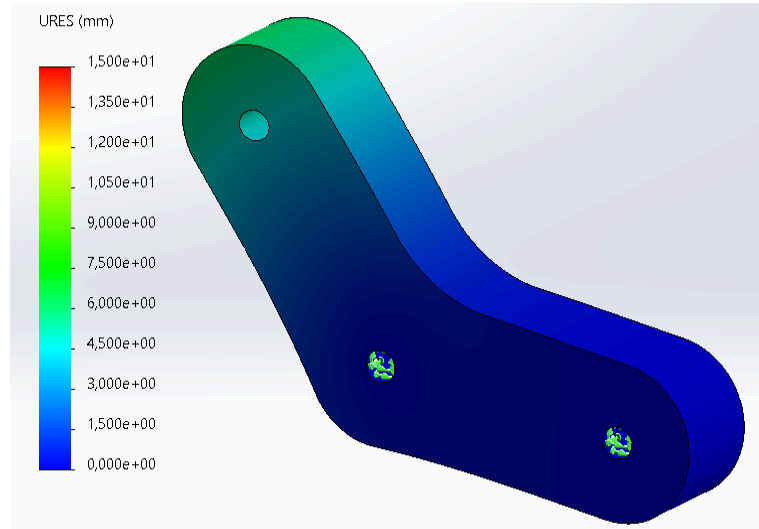
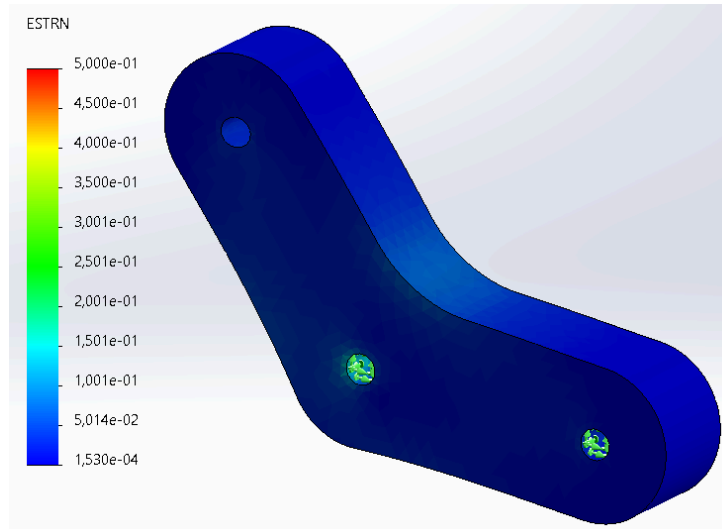
Ainda que os resultados quando comparados demonstram que o design híbrido apresentou resultados inferiores, deve-se atentar ao fato desse modelo ser mais leve, dessa forma para uma melhor comparação de resultados o ideal é fazer uma comparação relativa a massa.

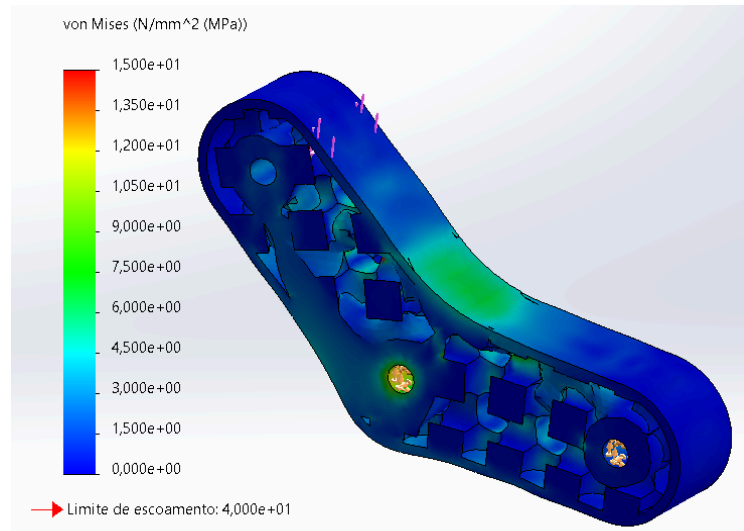
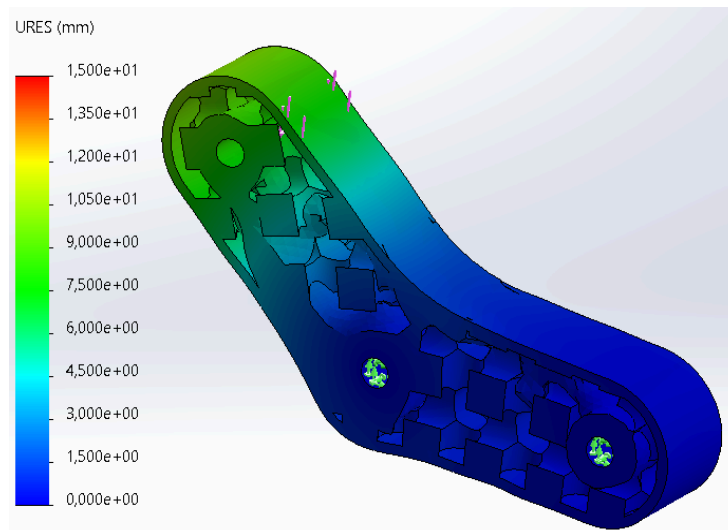
Dessa forma, ao multiplicarmos os resultados do design híbrido pela porcentagem de massa em relação ao modelo inicial, teremos que a tensão de Von Mises máxima relativa é de 14,76MPa, o deslocamento máximo relativa é de 7,08mm e a deformação relativa é de 0,22.

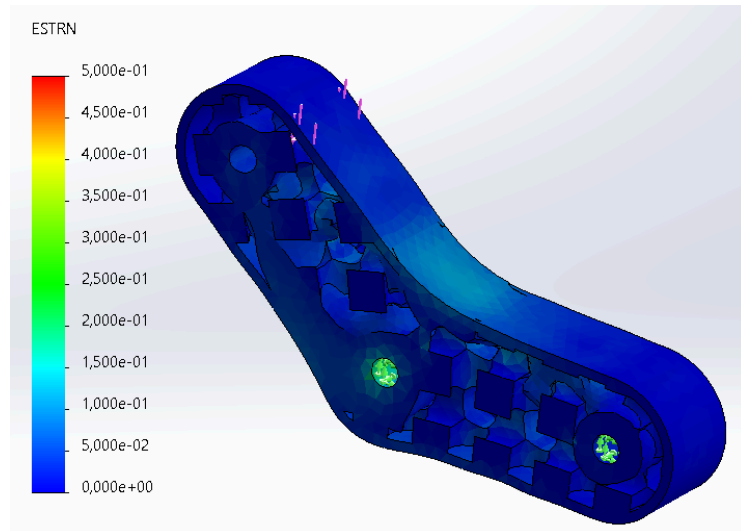
Ao compararmos esses valores com os do modelo inicial temos um aumento de 55,04% para tensão de Von Mises, 14,56% para o deslocamento e 46,67% para a deformação.

**Figura 27 - Resultado da simulação do modelo inicial (Tensão de Von Mises).**



**Figura 28 - Resultado da simulação do modelo inicial (Deslocamento).****Figura 29 - Resultado da simulação do modelo inicial (Deformação).**

**Figura 30** - Resultado da simulação do design híbrido (Tensão de Von Mises).**Figura 31** - Resultado da simulação do design híbrido (Deslocamento).

**Figura 32 - Resultado da simulação do design híbrido (Deformação).**

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com os resultados apresentados, os parâmetros estudados de mesoestrutura que mais influenciaram nas propriedades mecânicas e a massa foram tipo e densidade celular, respectivamente, enquanto que o tamanho de aresta e ângulo de inclinação, possuem pouco ou nenhum efeito sobre os resultados. A partir desses resultados foi determinado, pelo Minitab, que a melhor combinação de parâmetros de mesoestrutura é do tipo P-Skeletal, com densidade celular de 1,4, tamanho de aresta de 7mm e ângulo de inclinação de 0°.

O estudo de otimização de topologia produziu um modelo com redução de 63,4% da massa. Após a incorporação da mesoestrutura otimizada, o modelo novo apresenta 68,87% da massa original, contudo as propriedades mecânicas se demonstraram inferiores.

Embora os resultados tenham sido satisfatórios, é importante reconhecer que devido às limitações de software e hardware seria interessante, para a obtenção de valores mais próximos aos reais, a reprodução do estudo utilizando uma malha mais fina.

## REFERÊNCIAS

CERUTI, A.; FERRARI, R.; LIVERANI, A. Design for Additive Manufacturing Using LSWM: A CAD Tool for the Modelling of Lightweight and Lattice Structures. **Smart Innovation, Systems and Technologies**, p. 756–765, 2017.

WANG, C. et al. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 34, n. 5, p. 386–398, maio 2021.

CRISTACHE, C. M. Additive Manufacturing in Maxillofacial Prosthodontics. **Applied Sciences**, v. 13, n. 17, p. 9972–9972, 4 set. 2023.

**HADI, Adnen et al.** Design configurations and creation of lattice structures for metallic additive manufacturing. In: COLLOQUE NATIONAL AIP PRIMECA, **14**, 2015, La Plagne, France.

KHAN, N.; RICCIO, A. A systematic review of design for additive manufacturing of aerospace lattice structures: Current trends and future directions. **Progress in aerospace sciences/Progress in Aerospace Sciences**, v. 149, p. 101021–101021, 1 ago. 2024.

GODEC, D. et al. Introduction to Additive Manufacturing. p. 1–44, 1 jan. 2022.

YANG, X. L.; WANG, D.; YU, D. M. Development and Application of Four Typical Rapid Prototyping Technologies. **Applied Mechanics and Materials**, v. 160, p. 165–169, mar. 2012.

**INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; ASTM INTERNATIONAL. ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing – General principles – Fundamentals and vocabulary.** Geneva: ISO/ASTM International, 2021.

CUI, X. M. et al. Laminated Fabrication Ceramics by Aqueous Tape Casting Technology. **Materials Science Forum**, v. 475-479, p. 1275–1278, 15 jan. 2005.

WILLIAMS, J. D.; DECKARD, C. R. Advances in modeling the effects of selected parameters on the SLS process. **Rapid Prototyping Journal**, v. 4, n. 2, p. 90–100, jun. 1998.

HAO, L. et al. Characterization of selective laser-sintered hydroxyapatite-based biocomposite structures for bone replacement. **The Royal Society**, v. 463, n. 2084, p. 1857–1869, 22 maio 2007.

JUNK, S.; BÄR, F. Design guidelines for Additive Manufacturing using Masked Stereolithography mSLA. **Procedia CIRP**, v. 119, p. 1122–1127, 1 jan. 2023.

MCKNIGHT, M. Generative Design: What it is? How is it being used? Why it's a game changer. **KnE Engineering**, v. 2, n. 2, p. 176, 9 fev. 2017.

SAADI, J.; YANG, M. OBSERVATIONS ON THE IMPLICATIONS OF GENERATIVE DESIGN TOOLS ON DESIGN PROCESS AND DESIGNER BEHAVIOUR. **Proceedings of the Design Society**, v. 3, p. 2805–2814, 1 jul. 2023.

CUI, J.; TANG, M. X. Towards generative systems for supporting product design. **International Journal of Design Engineering**, v. 7, n. 1, p. 1, 2017.

KRISH, S. A practical generative design method. **Computer-Aided Design**, v. 43, n. 1, p. 88–100, jan. 2011.

AIRBUS. Pioneering bionic 3D printing | Airbus. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/newsroom/news/2016-03-pioneering-bionic-3d-printing>>.

JANG, S.; YOO, S.; KANG, N. Generative Design by Reinforcement Learning: Enhancing the Diversity of Topology Optimization Designs. **Computer-Aided Design**, v. 146, p. 103225, maio 2022.

AHMED, S.; GUPTA, M. K. Investigations on motorbike frame material and comparative analysis using generative design and topology optimization. **Materials Today: Proceedings**, dez. 2021.

OH, S. et al. Deep Generative Design: Integration of Topology Optimization and Generative Models. **Journal of Mechanical Design**, v. 141, n. 11, 16 set. 2019.

KLADOVASILAKIS, N.; TSONGAS, K.; TZETZIS, D. Mechanical and FEA-Assisted Characterization of Fused Filament Fabricated Triply Periodic Minimal Surface Structures. **Journal of Composites Science**, v. 5, n. 2, p. 58, 17 fev. 2021.

YIN, H. et al. Review on lattice structures for energy absorption properties. **Composite Structures**, v. 304, p. 116397, 15 jan. 2023.

GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids**. [s.l.] Cambridge University Press, 1999.

CHEN, L.-Y. et al. Additive manufacturing of metallic lattice structures: Unconstrained design, accurate fabrication, fascinated performances, and challenges. **Materials Science and Engineering: R: Reports**, v. 146, p. 100648, 1 out. 2021.

LI, Y. et al. High Mechanical Performance of Lattice Structures Fabricated by Additive Manufacturing. **Metals**, v. 14, n. 10, p. 1165–1165, 12 out. 2024.

KLADOVASILAKIS, N. et al. Experimental and Computational Investigation of Lattice Sandwich Structures Constructed by Additive Manufacturing Technologies. **Journal of Manufacturing and Materials Processing**, v. 5, n. 3, p.

95, 31 ago. 2021.

SCHAEDLER, T. A. et al. Ultralight Metallic Microlattices. **Science**, v. 334, n. 6058, p. 962–965, 17 nov. 2011.

EIRAS, P.; COSCIONE, A. R.; CARLOS. Métodos de otimização em química. **Revista Chemkeys**, n. 3, p. 1–18, 17 set. 2018.

BAUER, J. et al. High-strength cellular ceramic composites with 3D microarchitecture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 7, p. 2453–2458, 3 fev. 2014.

CUNICO, M. W. M. et al. PLANEJAMENTO FATORIAL: UMA FERRAMENTA ESTATÍSTICA VALIOSA PARA A DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS EXPERIMENTAIS EMPREGADOS NA PESQUISA CIENTÍFICA. **Visão Acadêmica**, v. 9, n. 1, 30 jun. 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 9. ed. Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc, 2017.

SHAMIM, R. Investigation of bending and crush behaviors in polymer lattice structures: Computational approaches and experimental evaluation. **Journal of Reinforced Plastics and Composites**, v. 44, n. 23-24, p. 2981–2995, 10 ago. 2024.