



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AMBIENTAIS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIS FELIPE ALEXANDRE DA SILVA

**Projeto da estrutura de um VANT: Design criado por otimização topológica e fabricação
por *Fused Deposition Modeling*-FDM**

MOSSORÓ

2021

LUIS FELIPE ALEXANDRE DA SILVA

**Projeto da estrutura de um VANT: Design criado por otimização topológica e fabricação
por *Fused Deposition Modeling*-FDM**

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Victor Wagner Freire de Azevedo,
Prof. Dr

MOSSORÓ

2021

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)
Setor de Informação e Referência

AS586 Alexandre da Silva , Luis Felipe .
p Projeto da estrutura de um VANT: Design criado
por otimização topológica e fabricação por Fused
Deposition Modeling-FDM / Luis Felipe Alexandre
da Silva . - 2021.
30 f. : il.

Orientador: Victor Wagner Freire de Azevedo,
Prof. Dr .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2021.

1. Otimização topológica,. 2. Manufatura
aditiva. 3. VANT. I. , Victor Wagner Freire de
Azevedo, Prof. Dr, orient. II. Título.

Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)
Luis Felipe Alexandre da Silva

Projeto da estrutura de um VANT: Design criado por otimização topológica e fabricação por *Fused Deposition Modeling*-FDM

Monografia apresentada à Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Defendida em: 18/11/ 2021.

BANCA EXAMINADORA

VICTOR WAGNER FREIRE
DE AZEVEDO:06133279427

Assinado de forma digital por VICTOR
WAGNER FREIRE DE
AZEVEDO:06133279427
Dados: 2021.11.26 13:30:55 -03'00'

Victor Wagner Freire de Azevedo , Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

Alex

Sandro de
Araújo Silva

Alex Sandro de Ara
Araújo Silva

Digitally signed by Alex Sandro de
Araújo Silva
DN: C=BR, OU=Eng. Mecânica,
O=UFERSA, CN=Alex Sandro de
Araújo Silva,
E=alex.araujo@ufersa.edu.br
Reason: I am the author of this
document
Location: your signing location here
Date: 2021.11.26 10:59:41-03'00'
Foxit PDF Reader Version: 11.1.0

Date:

Paulo Henrique Araújo Bezerra, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

2021.11.26
10:36:29 -03'00'

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer e dedicar esta dissertação e a conclusão deste curso as seguintes pessoas:

Minha mãe Maria de Lourdes, meu pai Manoel Alexandre, minhas irmãs Soralia Alexandre e Deizimar Alexandre e meus cunhados Alexandro Teixeira e Orlando Pereira. Sempre serão meus pilares em todas as conquistas que tive e terei.

A minha amada namorada Amanda Costa, por ter dividido comigo os dias difíceis dessa caminhada, serei eternamente grato por cada carinho seu.

Agradeço aos meus colegas Carlos Augusto e Gleimy Ferreira, pela parceria e pela amizade.

Agradeço ao meu orientador Victor Wagner, pela disponibilidade e atenção sempre que precisei, e pela pessoa e profissional sem igual.

Agradeço aos meus colegas de trabalho e amigos da Agritech semiárido, nos nomes de Erico, Felipe, Nougla, Cristiano, Vanderlei, Giovanny, Dedé, Jarismar, José Roberto, Israel, Fabio e Damião.

Acima de tudo agradeço a Deus pela saúde e por cuidar de cada detalhe dessa jornada.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.

Ayrton senna

RESUMO

A otimização topológica é um método usado para criar designs, e que pode ser usado no desenvolvimento de projetos estruturais, auxiliando a encontrar geometrias leves e eficientes. O processo de criação do design acontece por meio de um algoritmo, esse tipo de prática é conhecida por design generativo. No entanto, as geometrias resultantes da otimização topológica são geralmente complexas, o que torna a fabricação inviável pelos processos convencionais de manufatura. Por outro lado, os processos de manufatura aditiva destacam-se pela facilidade em fabricar geometrias de elevada complexidade. Diante disso, o objetivo do presente trabalho é desenvolver uma estrutura pelo método de otimização topológica, e simular sua fabricação por manufatura aditiva, focando no processo de FDM (Modelagem por Fusão e Deposição). O projeto desenvolvido foi da estrutura de um VANT(Veículo Aéreo não tripulado) do tipo quadricóptero; esse tipo de veículo tem sensibilidade à redução do peso da estrutura, pois toda economia na carga estrutural é diretamente traduzida em capacidade de carga útil e aumento de autonomia. Além disso, o projeto tem o objetivo de ser de fabricação acessível, para isso, a estrutura é montável, de forma que cada peça pode ser fabricada em uma impressora de baixo custo. Para guiar o desenvolvimento da estrutura, os estudos foram concentrados em entender as boas práticas do projeto, aplicando-as da melhor forma possível à otimização topológica e a fabricação por manufatura aditiva. Por fim, o resultado obtido foi uma estrutura de PLA (Poli Ácido Láctico) fabricado em FDM, e que pode ser comparada à do drone F650 (comercial, feito em fibra de carbono).

Palavras-chave: Otimização topológica, Manufatura aditiva, VANT.

ABSTRACT

Topological optimization is a method used to create designs that can be used in the development of structural designs, helping to find lightweight and efficient geometry. The design creation process happens through an algorithm, this type of practice is known as generative design. However, the resulting geometries from topological optimization are generally complex, which makes fabrication unfeasible by conventional manufacturing processes. On the other hand, additive manufacturing processes stand out for their ease in manufacturing highly complex geometries. Therefore, the objective of the present work is to develop a structure by the topological optimization method, and to simulate its fabrication by additive manufacturing, focusing on the FDM process (Melting and Deposition Modeling). The developed project was of the structure of a UAV (Unmanned Aerial Vehicle) of the quadricopter type; this type of vehicle is sensitive to reducing the weight of the structure, as any savings in structural load are directly translated into useful load capacity and increased autonomy. In addition, the project aims to be affordable to manufacture, for this, the structure is mountable, so that each part can be manufactured in a low-cost printer. To guide the development of the structure, studies were focused on understanding good design practices, applying them as best as possible to topological optimization and manufacturing by additive manufacturing. Finally, the result obtained was a PLA (Lactic Acid Poly) structure made of FDM, which can be compared to the F650 drone (commercial, made of carbon fiber).

.

Keywords: Topological optimization, Additive manufacturing, UAV.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivos específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	Método de Otimização Topológica	12
2.1.1	Abordagem SIMP	13
2.1.2	Função objetivo: Maximizar Rigidez	15
2.1.3	Análise sensitiva	15
2.3	Modelagem por fusão e deposição (FDM)	16
2.3.1	<i>Design For Additive Manufacturing</i> (DFAM)	17
3	METODOLOGIA	17
4	RESULTADOS	22
4.1	Análise do projeto otimizado	23
4.2	Simulação da fabricação	25
5	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS	28

1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos atuais têm incorporado a utilização de softwares CAD (Design Assistido por Computador) e CAE (Engenharia Assistida por Computador) como etapa primordial no desenvolvimento de novos produtos. No que diz respeito aos aspectos funcionais da engenharia, os projetos auxiliados por ferramentas computacionais têm vantagens claras em todas as fases do desenvolvimento, desde os estágios conceituais até o detalhamento [1].

Os projetos desenvolvidos com auxílio de simulação são otimizados e sem dúvidas são mais assertivos na busca pelo ideal, mas, para tal é exigido experiência do projetista nas análises, motivo pelo qual, por muito tempo, se restringiu a aplicação de técnicas de otimização à esfera acadêmica. Entretanto, para contornar a falta de experiência dos engenheiros projetistas, e criar um caminho intuitivo para desenvolvimento de estruturas otimizadas, foram criados os métodos de design generativo, que consistem em produzir estruturas com auxílio de regras ou algoritmos [2].

Dentre os métodos de otimização estrutural existentes na literatura, um que possui vasta aplicação é o Método de Otimização Topológica (MOT), que recentemente tem despertado interesse da indústria por auxiliar projetos estruturais inovadores no quesito eficiência. Pelos motivos citados, este é o método aplicado no desenvolvimento do presente trabalho, o MOT pode ser definido como um algoritmo que gera estruturas, atualmente é usado em diversos softwares CAE como alternativa para desenvolver designs leves e eficientes, para isso, o algoritmo distribui a massa de forma ideal dentro de um espaço de projeto [3]. No entanto, o design gerativo/generativo tem um gargalo na fabricação, pois o algoritmo comumente produz estruturas complexas, que não são viáveis de serem fabricadas por processos comuns de manufatura como: usinagem, fundição, injeção, conformação e soldagem.

Entretanto, com a evolução da manufatura aditiva, a impressão 3D emergiu de uma mera aplicação em prototipagem para um processo de manufatura final. A tamanha liberdade de processo proporcionada pela impressão 3D tem tornado possível produzir estruturas com geometria complexa. As vantagens da impressão 3D têm consolidado o processo como econômico e eficiente, caracterizando a manufatura aditiva como motor da indústria 4.0, revolucionando a forma como projetamos e fabricamos [4]. Os avanços na manufatura

aditiva foram o divisor de águas que viabilizaram os projetos desenvolvidos por otimização topológica.

Atualmente as pesquisas que suportam o desenvolvimento de estruturas pelo MOT são embasados em superar os desafios de design e fabricação. Os estudos são concentrados em desenvolver os chamados *Design for Additive Manufacturing* (DFAM ou projetos voltados para manufatura aditiva, em tradução livre) .O objetivo é desenvolver estruturas prontas para imprimir, como por exemplo: estruturas sem suporte e com limites bem definidos. Para isso são trabalhados métodos que mudam a solução ótima numericamente por restrições da manufatura, como ângulo de inclinação crítico e tamanho do recurso [5,6].

Dentro dos DFAM, as pesquisas mais incentivadas são as de estruturas sem suporte. A necessidade de um suporte é característica comum no processo de manufatura aditiva, mas que representa custo com material e tempo de processo, portanto, estruturas que não necessitam de suporte são mais eficientes economicamente. Esse tipo de estudo tem sido objeto de pesquisa de Langelaar [7,8], que em seus trabalhos desenvolveu um filtro para excluir da otimização topológica geometrias não imprimíveis, produzindo uma estrutura totalmente auto sustentável.

Portanto, com base no que foi dito acima, este trabalho apresenta o projeto da estrutura de um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), conciliando otimização topológica e manufatura aditiva. O VANT desenvolvido é um Drone do tipo quadricóptero, cujas vantagens de se ter uma estrutura otimizada são óbvias, pois são diretamente traduzidas em maior autonomia e maior capacidade de carga útil.

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver uma proposta de estrutura para VANT do tipo quadricóptero, para isso foi aplicado o método de otimização topológica na concepção do design da estrutura, entregando um projeto leve e eficiente, de acordo com o modelamento matemático aplicado, limitações e condições de contorno.

1.1.1 Objetivos específicos

- Apresentar uma abordagem de projeto diferente da mostrada por [9, 10], que trazem uma estrutura em bloco único, sugerindo um projeto dividido em módulos, cada módulo constitui uma peça da montagem do drone.

- Sugerir uma estrutura para ser de fabricação acessível. Para isso, foi escolhido como limitador a impressora ENDEE 3D PRO, ferramenta de baixo custo e comum no uso doméstico amador.
- Projetar uma estrutura para carga útil de 3 kg.
- Simulação a fabricação da estrutura projetada, buscando a maior eficiência de processo possível.
- Quantificar variáveis como tempo de fabricação e quantidade de material utilizado.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica contempla os conceitos abordados para o projeto e produção da estrutura do drone; definindo inicialmente a metodologia de projeto, caracterizando o MOT, e detalhando o método SIMP (*Solid Isotropic Microstructure With Penalization*), que foi a abordagem aplicada no projeto. Além disso, é definida a manufatura aditiva segundo o método de modelagem por fusão e deposição (*Fused Deposition Modeling-FDM*), esse foi o processo produtivo utilizado para simular as condições de fabricação da estrutura, nesse contexto é definido de forma resumida o princípio de fabricação FDM, e com maior ênfase é apresentado o DFAM.

2.1 Método de Otimização Topológica

O MOT começou a ser estudado a partir da publicação do artigo "*An investigation concerning optimal design of solid elastic plates*" [12], e a partir deste surgiram novos estudos como o publicado por Bendsøe e Kikuchi [13], que foi um marco neste segmento de pesquisa. O motivador do surgimento deste segmento de pesquisa foi desenvolver um algoritmo que buscasse entregar na particularidade de cada aplicação a estrutura ideal.

A abordagem tradicional para MOT é baseada na discretização do domínio da estrutura em uma malha gerada a partir do Método dos Elementos Finitos [14], a qual é chamada de microestruturas sólidas isotrópicas. O algoritmo do MOT dos métodos baseados na densidade atuam preenchendo os elementos com material nas regiões que requerem material, e esvaziando os elementos das regiões que se pode retirá-lo. Desse modo, que a distribuição da densidade do material dentro do domínio de projeto é discreta, e cada elemento recebe um valor binário, ou seja, existirão elementos sólidos (cujo valor de

densidade é atribuído como sendo igual a 1) e elementos vazios (com valor de densidade igual a 0).

2.1.1 Abordagem SIMP

O método de otimização topológica se divide em diferentes abordagens, dentre os existentes, as mais usadas são a SIMP [15] (*Solid Isotropic Microstructure With Penalization*) e a BESO [16] (*Bi-directional Evolutionary Structural Optimization*). O método BESO apresenta resultados mais eficientes que o SIMP, entretanto, a um custo computacional muito maior. Por isso, a abordagem pelo método SIMP é a mais utilizada pelos Softwares CAE de mercado, e por isso, é aplicada no presente trabalho.

A metodologia SIMP difere da abordagem tradicional porque permite densidades intermediárias, evitando a natureza binária on-off das soluções, pois cada elemento pode variar a densidade de um valor mínimo ρ_{min} até um máximo de 1; os elementos de densidade intermediária são caracterizados como elementos porosos. O ρ_{min} é a mínima densidade relativa permitida para elementos que podem ser direcionados para o vazio. Esse valor garante a estabilidade numérica da análise de elementos finitos, por isso reduz o custo computacional [15].

Como no método SIMP a densidade pode variar continuamente, o módulo de Young em cada elemento também pode variar continuamente. Entretanto, essas variações intermediárias são indesejáveis, pois criam elementos de rigidez intermediária, o que não é possível de reproduzir. Por isso, foi desenvolvida uma relação para penalização desses elementos, e para cada elemento e , a relação entre o fator de densidade relativa (ρ_e) e o módulo de elasticidade de Young do modelo de material isotrópico atribuído (E_0) é calculada pela lei de potência a seguir :

$$E(\rho_e) = \rho_e^p * E_0 \quad (1)$$

Sendo (ρ_e) o fator de densidade relativa, e (E_0) módulo de elasticidade de Young do modelo de material isotrópico, e p o fator de penalidade. A função do p é diminuir a contribuição dos elementos com densidades intermediárias, penalizando sua contribuição na matriz de rigidez total, direcionando a solução de otimização para elementos sólidos (cuja

densidade é igual a 1) ou elementos vazios (cuja densidade é igual a 0). Experimentos numéricos indicam que um valor de fator de penalidade de $p = 3$ é adequado.

Segundo o método SIMP, a rigidez global é modulada de acordo com a Eq. 2 [15]:

$$K_{SIMP(\rho)} = \sum_{e=1}^N [\rho_{min} + (1 - \rho_{min})\rho_e^p] K_e \quad (2)$$

Onde:

K_e matriz de rigidez do elemento;

ρ_{min} é a densidade relativa mínima;

ρ é a densidade relativa do elemento;

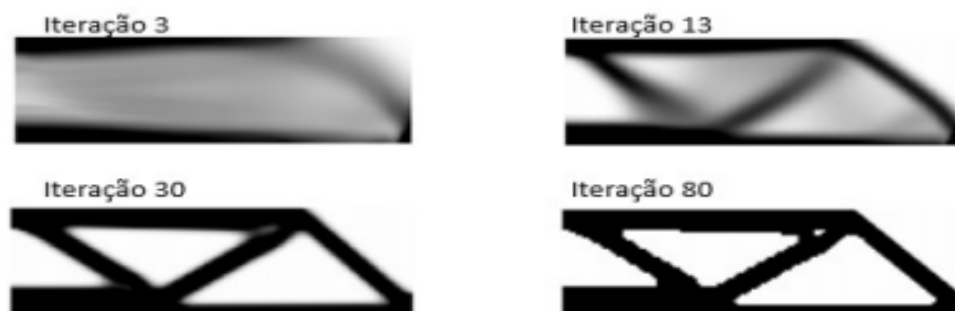
p é o fator de penalidade;

N é o número de elementos no domínio do projeto;

Por exemplo, para uma matriz de um único elemento com uma densidade relativa atribuída $\rho_e = 0,5$, fator de penalidade $p = 3$ e $\rho_{min} = 0,001$, a matriz de rigidez global é dimensionada por um fator de $(0,001 + (1 - 0,001) * 0,5^3) = 0,12587$.

A Fig. 2 mostra o método de penalização atuando em um modelo, eliminando os elementos intermediários (cinza), direcionando a solução para elementos que são totalmente pretos ($\rho_e = 1$) ou vazios ($\rho_e = \rho_{min}$).

Figura 1: Aplicação de penalidades no modelo SIMP.



Fonte: Adaptado de [15].

2.1.2 Função objetivo: Maximizar a Rigidez

No caso da otimização utilizando ANSYS, o objetivo comum é maximizar a rigidez global da estrutura. Para isso, a abordagem usada é minimizar a sua flexibilidade sob uma determinada quantidade de remoção de massa. A flexibilidade é uma forma de trabalho realizado pela estrutura devido à aplicação de carga na mesma, também pode ser entendida como uma medida de flexibilidade geral de um estrutura, o que é recíproco da rigidez., dessa forma, minimizar a conformidade global, C , é equivalente a maximizar a rigidez global, a Eq. 3 representa a conformidade global da estrutura [17].

$$\min C(\{\rho\}) = \sum_{e=1}^N [\rho_e]^p [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (3)$$

Sendo u_e o vetor de deslocamento nodal do elemento, K_e é a rigidez do elemento, e o vetor $\{\rho\}$ contém as densidades relativas dos elementos ρ_e . O algoritmo de otimização, por meio de um processo iterativo, busca resolver as densidades dos elementos (que são as variáveis de projeto de otimização) que minimizam a conformidade global da estrutura.

2.1.3 Análise de sensibilidade

Durante cada iteração do processo de solução, o algoritmo do MOT realiza uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto que a variação das densidades do material tem na função objetivo para maximizar a rigidez. Matematicamente, a análise de sensibilidade é expressa como a derivada da função objetivo em relação às densidades do material [18]:

$$\frac{dC}{d\rho_e} = - p [\rho_e]^{p-1} [u_e]^T [K_e] [u_e] \quad (3)$$

Durante uma análise de sensibilidade, os elementos ponderados com fatores de baixa densidade eventualmente perdem sua importância estrutural e são eliminados durante as iterações posteriores. Um problema muito conhecido que ocorre durante a análise sensitiva é o chamado tabuleiro de xadrez, esse efeito acontece se não for considerada a conectividade entre os elementos da malha, o que leva ao surgimento de volumes desconectados da geometria principal. Para reduzir o efeito quadriculado, um esquema de filtragem aplica um raio de influência do elemento e calcula a média das sensibilidades de cada elemento dentro de sua região de influência [18].

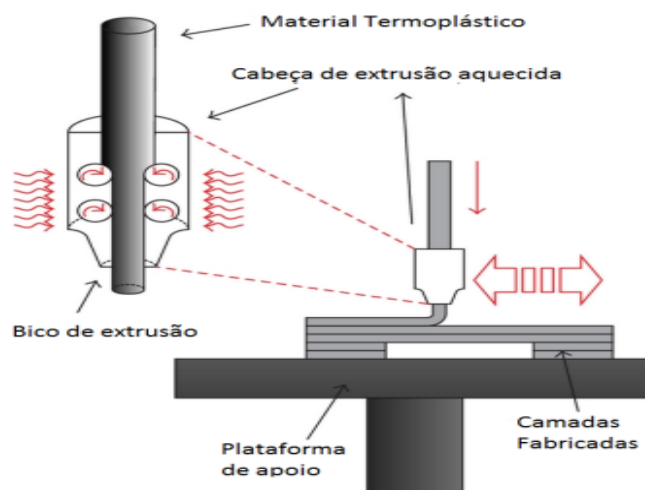
De forma resumida, o algoritmo para aplicação do MOT pode ser explicado nos seguintes passos:

- Faça um projeto inicial, por exemplo, distribuição homogênea de material.
- Para essa distribuição de densidade, calcule por elementos finitos os deslocamentos e tensões resultantes.
- Calcule a conformidade do design. Se houver melhorias satisfatórias na conformidade em relação ao último design, pare as iterações. Caso contrário continue.
- Calcule a atualização da variável de projeto.
- Repita o loop de iterações.

2.2 Modelagem por Fusão e Deposição (FDM)

No processo de impressão por FDM, o material de base é um filamento sólido que é fundido, passando através de um bico de extrusão e sendo depositado em camadas para construção do modelo sólido. Os materiais comumente utilizados são polímeros como o PLA (Polyacid Lactic) e o ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), entretanto, a impressão 3D tem se popularizado em diferentes setores produtivos, evoluindo o processo para incorporar materiais diversos como: concreto, titânio, fibra de carbono, aços e suas ligas. A Fig.1 ilustra o processo [19].

Figura 2 : Processo de Modelagem por Fusão e Deposição típico.



Fonte: Adaptado de [19].

2.2.1 Design For Additive Manufacturing (DFAM)

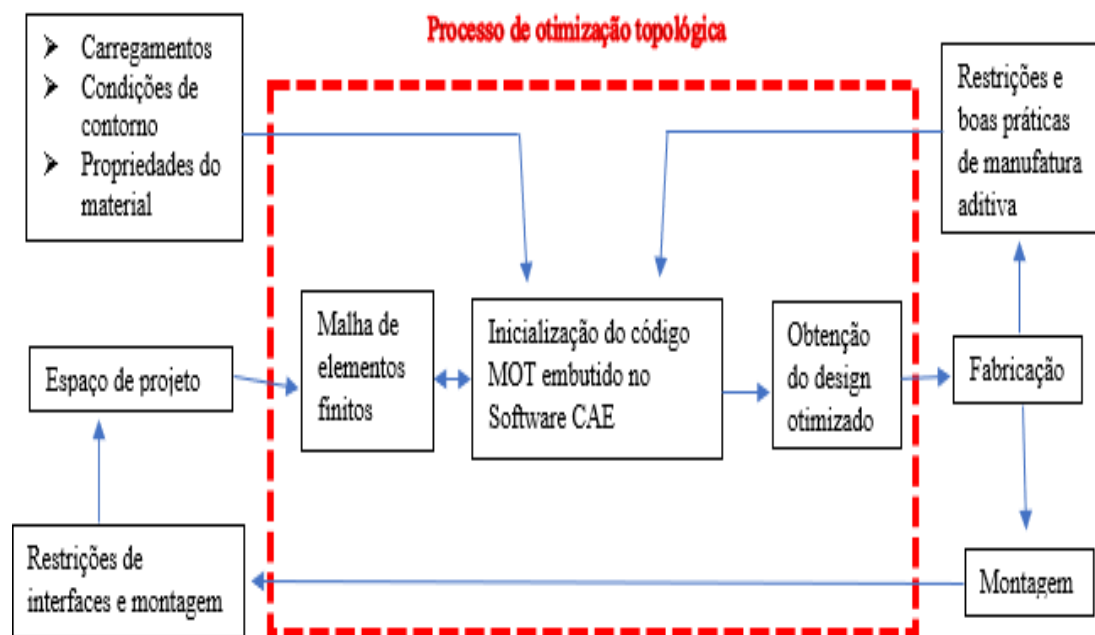
O DFAM tem dois propósitos: o primeiro é listar os requisitos e boas práticas para fabricação por manufatura aditiva, o segundo é integrar as boas práticas no desenvolvimento do produto. A seguir são mostradas alguns conceitos a serem seguidos no desenvolvimento do DFAM:

- No desenvolvimento do projeto deve ser considerado como vai ser removido o suporte, se o mesmo estiver em locais de difícil acesso sua remoção é complicada e pode alterar o acabamento superficial [20].
- Deve-se evitar volumes ocos [21].
- Em sólidos cilíndricos ocos o modelo deve ser posicionado na vertical, a fim de imprimir sem suporte [21].
- Evitar cantos vivos, em vez disso usar cantos arredondados ou chanfrados. Devido a largura de deposição do material, os cantos vivos costumam apresentar defeitos de fabricação [22].
- Dividir modelos complexos em peças modulares para montagem [22].
- Respeitar o tamanho mínimo fabricado pelo equipamento de manufatura aditiva [21].
- Minimizar o uso de ilhas. Adam & Zimmer (2013) definem ilhas como partes da estrutura que se iniciam em uma camada de construção acima da base da peça e crescem em uma direção perpendicular ao corpo inicial.
- Deve-se estudar a melhor posição de impressão, diferentes posições apresentam mais ou menos suporte. [22].

3. METODOLOGIA

A aplicação do MOT voltada à manufatura aditiva segue o fluxograma mostrado na Fig. 3.

Figura 3: Fluxograma de um processo de otimização voltado à manufatura aditiva.

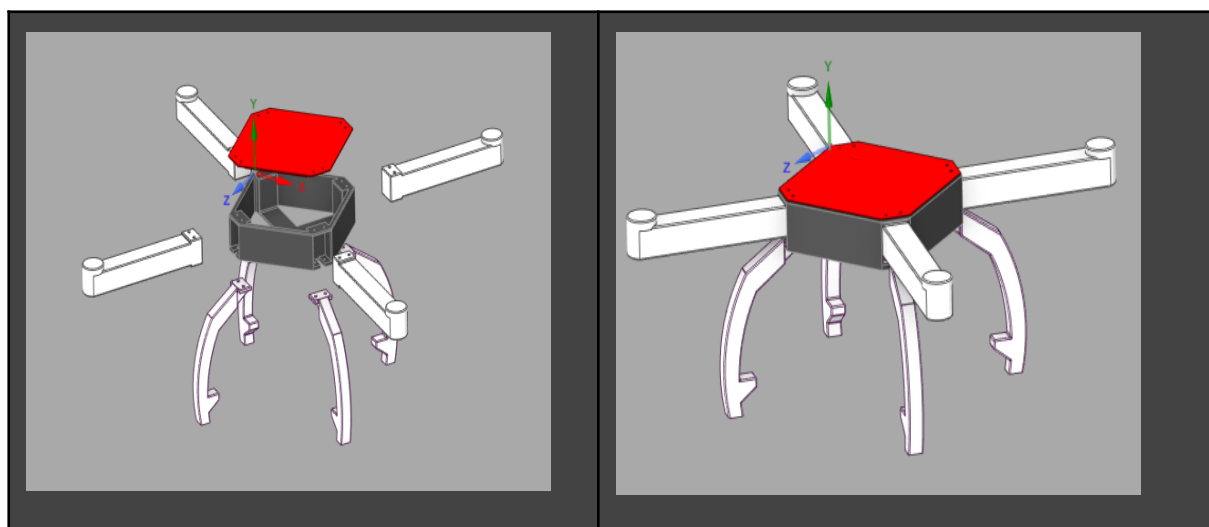


Fonte: Do autor.

Como mostrado na Fig. 3, inicia-se o processo de otimização topológica determinado o espaço de projeto, as restrições de montagem, os carregamentos, condições de contorno e as propriedades do material. Essas etapas iniciais podem ser entendidas como entradas necessárias ao algoritmo de otimização topológica. Depois da obtenção da geometria são realizadas etapas de pós processamento da solução, para adequar da melhor forma possível a geometria ao processo produtivo. Todas as etapas do processo são detalhadas a seguir.

Etapa 1: Como é determinado o espaço de projeto (modelo a ser otimizado); foi feita a modelagem 3D de um quadricóptero usando o software CAD Ansys SpaceClaim [23]. O espaço de projeto tem inspiração no drone F650, esse modelo foi usado como base por já ser bastante otimizado. As estruturas foram modeladas sem muitos detalhes de design, para não limitar a atuação do algoritmo de otimização. As dimensões principais da estrutura são: diagonal de 65 cm e altura de 20 cm, podendo ainda acomodar no trem de pouso um pacote de volume 25x25x20 [cm]. A Fig. 4 ilustra o modelo desenvolvido.

Figura 4: Espaço de projeto (Modelo para otimização)



Fonte: Do autor.

Etapa 2: O próximo passo foi determinar o material de fabricação da estrutura, bem como suas propriedades. O material foi escolhido de acordo com a recomendação da impressora selecionada para fabricar o modelo, que é o PLA (Poli Ácido Láctico). A Tab. 1 mostra as propriedades desse material:

Tabela 1: Propriedades de massa e propriedades mecânicas do PLA

Característica	Unidade	Valor
Densidade	g/cm ³	1.27
Resistência à Tração	MPa	73
Força de Rendimento	MPa	70
Resistência à Flexão	MPa	106
Módulo de Young	MPa	1280
Alongamento na Ruptura	%	7
Coefficiente de Poisson	-	0.36

Fonte: Adaptado de [24]

Fase 3: A etapa subsequente se passa no software CAE Ansys Discovery. Nele foi criado o modelo matemático que fornece as condições de contorno para realizar as simulações estruturais (estáticas) que guiam o algoritmo de otimização. O processo de otimização será aplicado aos braços e ao trem de pouso, ambas estruturas modeladas como vigas engastadas na região onde as peças serão aparafusadas na *Frame* central. Para braço o carregamento aplicado é o empuxo e torque derivados do motor, o Prop Drive series 50-50 foi o motor escolhido, esse modelo também é usado no drone F650. Para submeter a estrutura a condições severas, o carregamento de empuxo considerado foi o máximo informado pelo fabricante do motor. No caso do trem de pouso o carregamento é o equivalente a um pacote de 3 kg. O modelo de motor escolhido foi o NTM Prop Drive series 50-50, esse motor foi escolhido por ser o modelo usado no drone F650. Para submeter a estrutura a condições severas, o carregamento de empuxo considerado foi o máximo fornecido pelo fabricante do motor. Os carregamentos foram determinados conforme a Tab. 2.

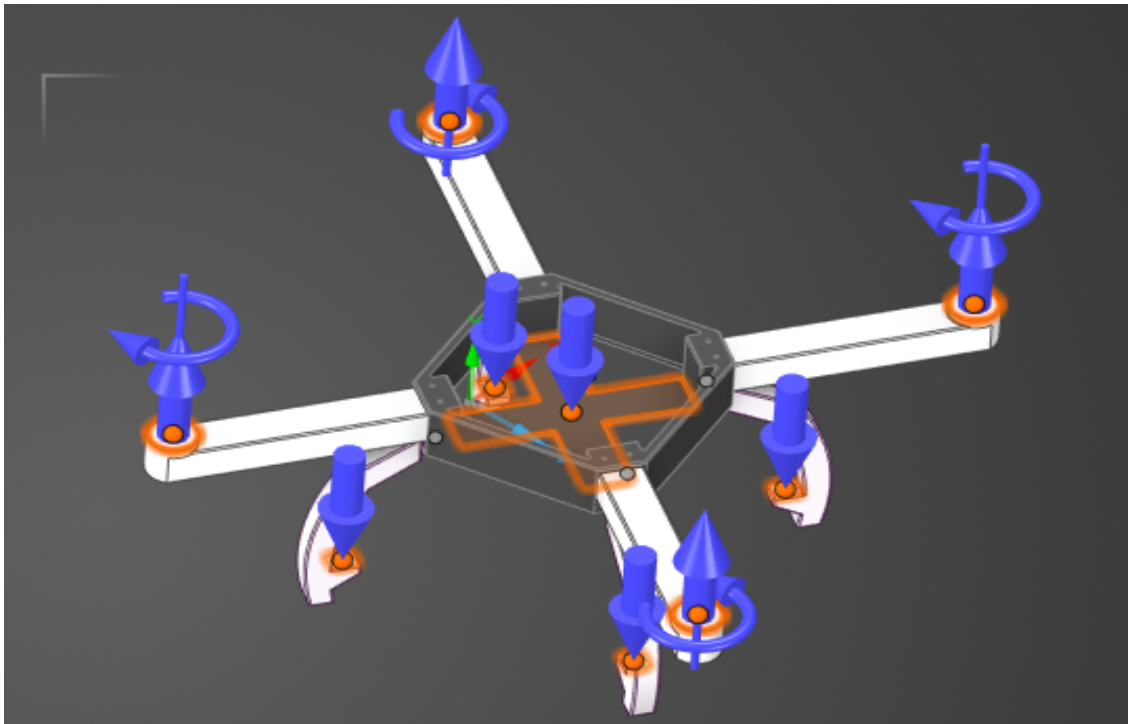
Tabela 2: Carregamentos aplicados na estrutura.

Origem do carregamento	Tipo	Peça de aplicação	Intensidade
Empuxo do motor	Força distribuída	Braço	32 N
Torque do motor	Torque	Braço	0,696 N.m
Carga útil estimada	Força distribuída	Trem de pouso	8 N
Carga dos eletrônicos e bateria	Força distribuída	<i>Frame</i> central	15 N

Fonte: Do autor.

A Fig.4 ilustra como os carregamento foram aplicados na estrutura, vale observar que os braços estão modelados como simples vigas em balanço, essa condição é extremamente idealizada, porém submete o modelo a um carregamento extremo.

Figura 4: Carregamentos da estrutura.



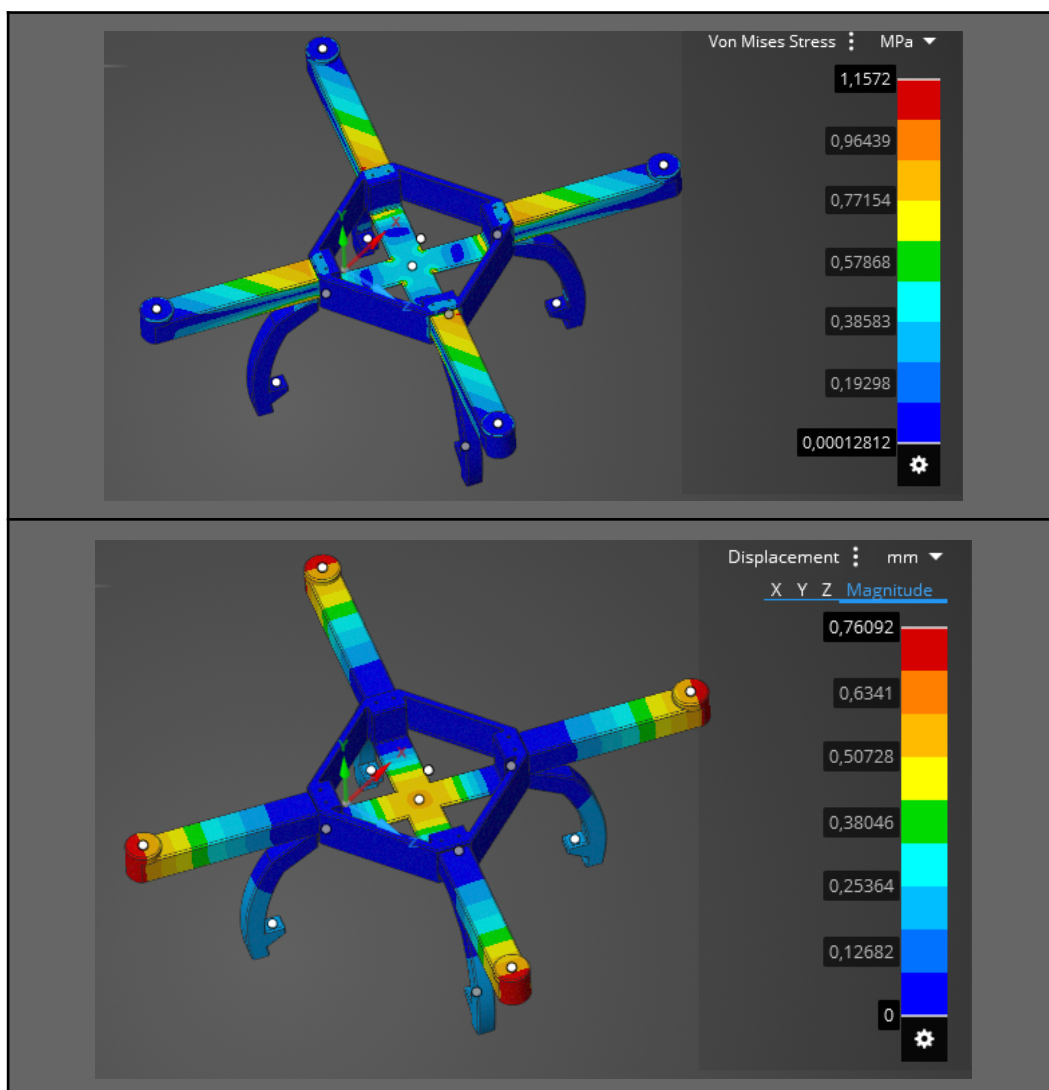
Fonte: Do autor.

Etapa 4: Como última etapa, inicia-se o processo de otimização propriamente dito, começando pelo cálculo pelo método de elementos finitos dos deslocamentos e tensões resultantes, para as análises foi adotado uma malha de elementos triangulares com arestas de 1,74 mm. Depois disto, já no ambiente de otimização do Software CAE Ansys Discovery [25], foi definido reduzir 85 % do volume da estrutura minimizando a conformidade global. Essa porcentagem de redução torna a estrutura projetada com peso próximo ao drone F650. Como restrições foi estabelecido uma espessura mínima de 5mm nas regiões de contato entre peças, furações e superfícies de aplicações de carga. A *frame* central passou apenas por uma simples otimização paramétrica para redução de espessura.

4. RESULTADOS

Depois dos passos anteriores, o primeiro resultado mostrado é o estado de tensões e deslocamentos do modelo inicial.

Figura 5: Análise de tensões e deslocamento.

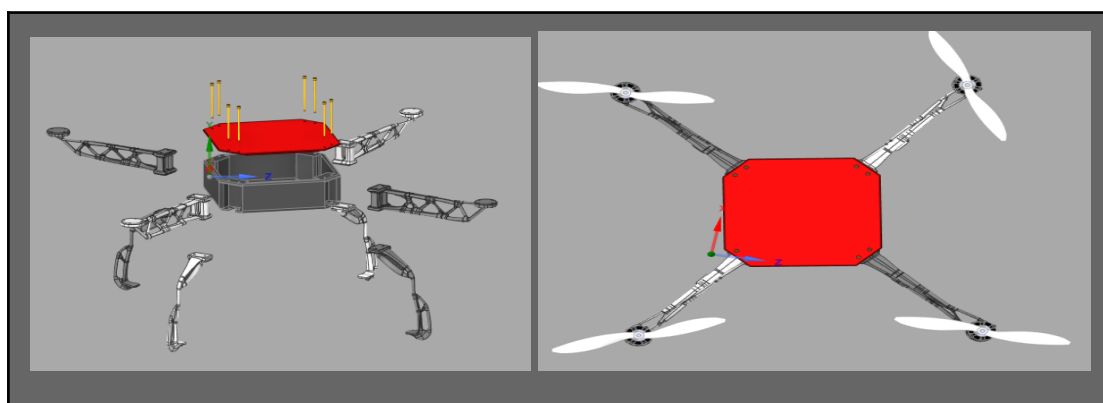


Fonte: Do autor.

Como critério de análise de tensões foi utilizado o modelo de Von Mises, para o modelo inicial as tensões máximas foram de 1,15 MPa e deslocamento máximo de 0,7 mm na direção y (eixo de cor verde mostrado na Fig. 5). A seguir é mostrado o modelo de

convergência do algoritmo de otimização, o resultado ilustrado na Fig.6 é do pós processamento da estrutura no software Ansys SpaceClaim. Essa etapa posterior a solução foi necessária porque na conversão do modelo de elementos de malha para elementos de casa ocorreram algumas imperfeições superficiais, isso foi decorrente do pouco poder de processamento da máquina utilizada no processo, durante essa etapa foi feita a suavização da malha otimizada e foram corrigidas imperfeições.

Figura 6: Modelo otimizado topologicamente.

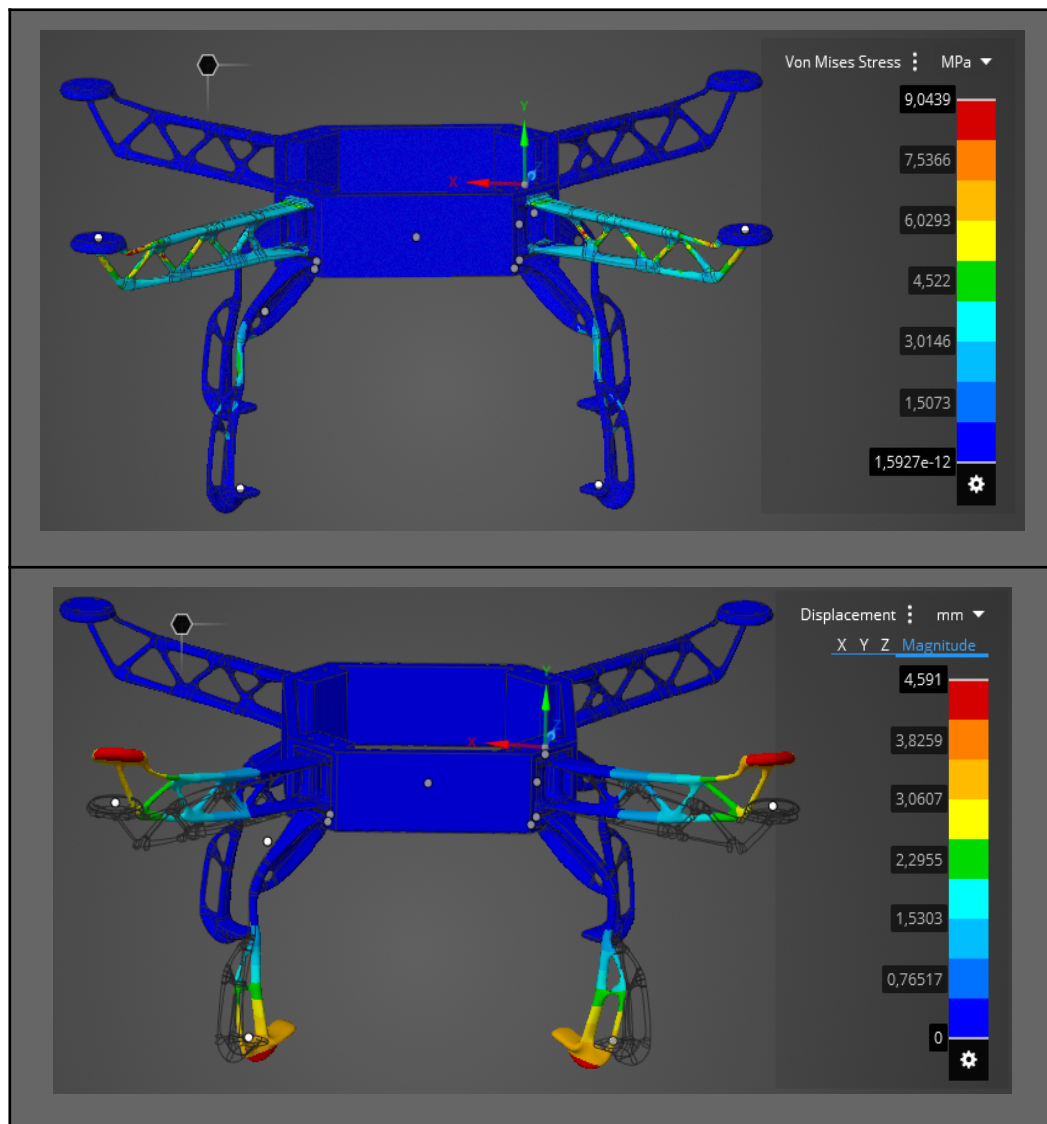


Fonte: Do autor.

4.1 Análise do projeto otimizado

Como mostrado no início desta seção, o modelo inicial é superdimensionado, tendo uma estrutura com coeficiente de segurança maior que 60, além disso, o modelo concentra as tensões nos pontos próximos às fixações. Já o projeto otimizado cria um design melhor dimensionado. O resultado apresentado mostra que uma estrutura é pouco provável de ser desenvolvida por um projetista, para os braços o resultado é dado em estrutura treliçada, uma construção eficiente, e com aplicações comuns na indústria da metal mecânica. Para o trem de pouso apesar de otimizado topologicamente, pode-se fazer referência a um design bioinspirado, facilmente podemos associar o design do trem de pouso a patas de um caranguejo ou de um inseto.

O modelo otimizado foi revalidado por simulação estrutural, resultado é apresentado na Fig. 7.

Figura 7: Análise de tensões e deslocamento.**Fonte: Do autor.**

Para o modelo otimizado o máximo estado de tensões de Von Mises é de 9 MPa, o que dá um coeficiente de segurança de 8. O deslocamento foi multiplicado para 4,5 mm na direção y (eixo verde mostrado na Fig.7), entretanto o deslocamento ainda é bem pequeno, e como foi considerado condições extremas para as análises estruturais, esperasse que em operação normal a estrutura tenha deslocamentos ainda menores.

Outro fator importante a ser observado na estrutura gerada é o estado de tensão bem distribuído da peça, principalmente nos braços, quase toda estrutura está na cor azul claro, mostrando um gradiente de tensões uniforme. O estado máximo de tensões está nas treliças que são tracionadas, fazendo com que a estrutura absorva melhor os carregamentos, sem concentrá-lo no ponto de fixação.

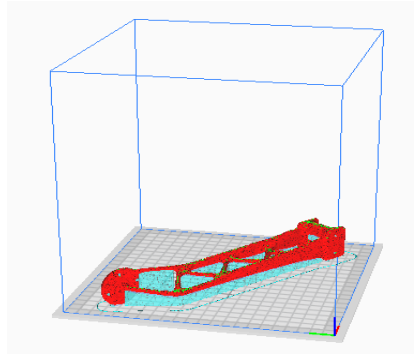
4.2 Simulação da Fabricação.

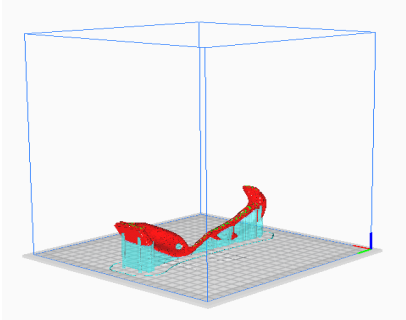
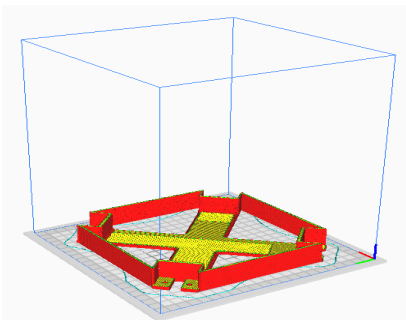
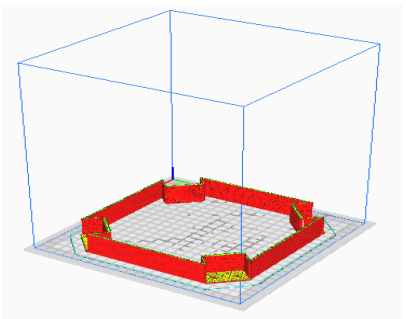
Para simular o processo de fabricação foi utilizado a ferramenta Ultimaker Cura [26], configurado para impressora ENDEE 3D PRO. Foram simuladas duas configurações de fabricação, a primeira com a estrutura adensada a 100% , ou seja, reproduzindo fielmente a estrutura projetada, imprimindo os corpos com camadas contínuas. Na segunda, a impressão foi configurada para ter estrutura como elemento de casca com interior preenchido a porosidade de 10 % com elementos que formam estruturas triangulares, neste caso a estrutura é mais leve, e é fabricada de forma mais rápida, porém é mais frágil. A ideia é fabricar duas estruturas, uma para aplicação em voos com carga e outra para voo sem carga, e a partir de testes determinar a melhor configuração para cada aplicação, desta forma, utilizando um único projeto pode-se atender aplicações distintas apenas mudando as configurações de fabricação.

Na Tab. 4 mostras as principais informações da configuração de fabricação, definindo as seguintes características:

- Posicionamento de impressão
- Posicionamento das camadas.
- Tempo de fabricação
- Quantidade de material para peça
- Regiões de necessidade de suporte
- Quantidade de material para suporte

Tabela 4: Principais características da fabricação da estrutura.

Modo de impressão	Características
	• Porosidade 10% Massa de material da peça = 38 g Massa de material do suporte = 12 g Tempo de fabricação= 13h e 17 min.
	• Porosidade 100% Massa de material da peça = 58 g Massa de material do suporte = 12 g Tempo de fabricação= 20h e 44 min

	● Porosidade 10% Massa de material da peça = 20 g Massa de material do suporte = 6 g Tempo de fabricação= 8h e 49 min. ● Porosidade 100% Massa de material da peça = 30 Massa de material do suporte = 10 g Tempo de fabricação= 11h r 39 min
	● Porosidade 10% Massa de material da peça = 90 g Massa de material do suporte = 0g Tempo de fabricação= 20h e 50 min. ● Porosidade 100% Massa de material da peça = 130 Massa de material do suporte = 0g Tempo de fabricação= 33h
	● Porosidade 10% Massa de material da peça = 70g Massa de material do suporte = 0 g Tempo de fabricação= 18h e 36 min ● Porosidade 100% Massa de material da peça = 90 g Massa de material do suporte = 0 g Tempo de fabricação= 26h e 9 min

Fonte: Do autor.

Como pode ser visto nas figuras da Tab.4, os braços e o trem de pouso necessitam de suporte (representado pela cor azul). Não foi possível aplicar filtro para eliminar essa necessidade, pois o Ansys Discovery não detém desta aplicação e não permite alteração do código do MOT. A tampa da *frame* central não foi incluída na fabricação, pois não é um elemento necessário.

Para reduzir o máximo possível o suporte, o trem de pouso e o braço foram testados em 6 posições de impressão, o resultado apresentado na Tab. 4 é o mais eficiente. Além disso, a *frame* foi dividida em duas peças, assim foi eliminada totalmente a necessidade de suporte. Para dar mais resistência à peça, a impressão deve ser realizada de forma que as camadas fiquem orientadas ao longo do comprimento maior da peça. Por fim, a estimativa de peso da primeira configuração é uma estrutura com 392 g fabricada em 5,5 dias, já a segunda configuração produz uma estrutura com 572 g fabricada em 7,6 dias.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu uma proposta de estrutura de um drone do tipo quadricóptero. Apresentando todas as fases para criação do produto, desde o projeto orientado pelo MOT até as configurações de fabricação. Comparando o modelo gerado com um quadricóptero de mesmas dimensões, o Drone F650, as vantagens das metodologias aplicadas ficam claras, o F650 é construído em fibra de carbono e pesa 500 g, o modelo projetado se produzido em estrutura 100% adensada pesa apenas 72 g a mais, e se produzido com preenchimento a 10% e 108 g mais leve. Considerando as limitações de hardware e de material impostas, os resultados obtidos são excelentes, tendo ainda margem para melhorar se o modelo puder ser fabricado em materiais mais nobres. Além disso, a principal vantagem de ter aplicado essa metodologia foi produzir uma estrutura bem dimensionada e em poucas análises, pois todas as iterações na busca do melhor design foram feitas dentro do algoritmo, entregando ao projetista em uma única etapa a redução de 85% do volume do projeto inicial, distribuindo de forma eficiente as tensões na estrutura, e reduzindo de forma inteligente o coeficiente de segurança superdimensionados de 63 para o aceitável de 8.

6. REFERÊNCIAS

- [1] ALVES FILHO, Avelino. **Elementos finitos: a base da tecnologia CAE: análise não linear**. 1ª Ed. São Paulo:Érica, 2012.
- [2] McKnight, M. **Generative Design: What is it? How is it being used? Why it's a game changer**. KNE Eng., p 176–181, 2017.
- [3] BENDSØE, M.P.;SIGMUND,O. **Topology Optimization: theory,methods and applications**.Springer: Berlin, 2003.
- [4] U.M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, et al., **The role of additive manufacturing in the era of industry 4.0**. p. 545-554, 2017.
- [5] S. Yang, Y.F. Zhao, **Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review**, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* p. 327-342, 2015.
- [6] M. Kumke, H. Watschke, T. Vietor, **A new methodological framework for design for additive manufacturing**, *Virtual Phys. Prototyp.* p. 3-19, 2016.
- [7] M. Langelaar, **An additive manufacturing filter for topology optimization of print-ready designs**, *Struct. Multidiscip. Optim.* p. 871-883, 2017.
- [8] M. Langelaar, **Topology optimization of 3D self-supporting structures for additive manufacturing**, *Addit. Manuf.* p. 60-70, 2016.
- [9] Bright .J, Rajkumar S., Menon A. S. and Abimannan. **Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame IOP**. Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2020.
- [10] A. S. Martinez Leon, A. N. Rukavitsyn, S. F. Jatsun, **Topology optimization of a UAV airframe**, 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020), p. 338-346, 2020.
- [11] ENGIPRINTERS. **Os tipos de tecnologia de impressão 3D**. Eng Printers, 2021. Acesso em: Maio de 2021.
- [12] CHENG, K.; OLHOFF, N. **An investigation concerning optimal design of solid elastic plates**. *International Journal of Solids and Structures*, 17: p. 305– 323, 1981.
- [13] BENDSØE, M.P., KIKUCHI, N. **Generating optimal topologies in structural design using homogenization**. *Comput Methods Appl Mech Eng*, 71:197-224, 1988.
- [14] MIRLISENNA, G. **Método dos elementos finitos: o que é?** ESSS, 2016. Acesso em: Maio de 2021.

- [15] Stuttgart Research Centre for Simulation Technology (SRC Sim. Tech.), Stuttgart University. “**A new adaptive penalization scheme for topology optimization**” A.Dadalau, A. Hafla, and A.Verl.2008
- [16] X.Y. Yang, Y.M. Xei, G.P. Steven, et al., **Bidirectional evolutionary method for stiffness optimization**, AIAA J. 37, p.1483-1488, 1999.
- [17] BENDSØE, M.P.; SIGMUND, O. **Topology Optimization Theory, Methods, and Applications**. Springer, Dinamarca, 2 edition, 2004.
- [18] A. Diaz and O. Sigmund, **Checkerboard patterns in layout optimization**. Struct. Optim. 1995. Vol: 10: 40-45.
- [19] TSOUKNIDAS, A. Friction induced wear of rapid prototyping generated materials: a review. **Advances in Tribology**, v. 2011, Article Id 746270, 2011. Disponível em: <<http://www.hindawi.com/journals/at/2011/746270/>> Acesso em 10 de out. 2021.
- [19] ALTAIR UNIVERSITY. **Practical aspects of structural optimization**. Michigan,2014.
- [20] BORILLE, A.V. **Decision support method to apply Additive Manufacturing Technologies for plastic components in the aircraft industry**. 173f. Tese (Doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônica) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos. 2009.
- [21] KOLOSSOSKI, G. **Considerações geométricas para fabricação de componentes aeronáuticos pelo processo de Fused Deposition Modeling- FDM**. Troy: Altair Product Design, 2002.
- [22] ADAM, G. A. O.;ZIMMER, D. Design for additive manufacturing: element transitions and aggregated structures. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v.7, p20-28, 2013.
- [23] ANSYS SpaceClaim: **3D Modeling Software**. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-spaceclaim>> Acesso em 11 de nov. 2021.
- [24] PLA (96:4 L:D ratio content) Made by: **NatureWorks Co., technical data sheet**, Disponível em: <www.natureworkslc.com> Acessado em 3 de jul de 2021.
- [25] ANSYS Discovery: **3D Simulation Software**. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>> Acesso em 11 de nov 2021.
- [26] Ultimaker Cura: **3D printing software**. Disponível em: <<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura>> Acesso em 13 de nov 2021.