

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

DANIEL BORCHE MAYLINCH

**Estudo de nervuras estruturais de asas para VANTS fabricadas a partir de manufatura aditiva
com materiais compósitos e sua viabilidade econômica :**

São João da Boa Vista

2022

Daniel Borsche Maylinch

Estudo de nervuras estruturais de asas para VANTS fabricadas a partir de manufatura aditiva com materiais compósitos e sua viabilidade econômica :

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Aeronáutica .

Orientador: Profº Dr. Crystopher Cardoso de Brito

Coorientador:

São João da Boa Vista

2022

M469e Maylinch, Daniel Borsche
Estudo de nervuras estruturais de asas para vants fabricadas a partir de manufatura aditiva com materiais compósitos e sua viabilidade econômica / Daniel Borsche Maylinch. -- São João da Boa Vista, 2022
38 f. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Crystopher Cardoso de Brito

1. Engenharia. 2. Impressão tridimensional. 3. Estudos de viabilidade. 4. Aeronáutica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO DE NERVURAS ESTRUTURAIS DE ASAS PARA VANTS FABRICADAS A
PARTIR DE MANUFATURA ADITIVA COM MATERIAIS COMPÓSITOS E SUA
VIABILIDADE ECONÔMICA**

Aluno: Daniel Borche Maylinch

Orientador: Prof. Dr. Crystopher Cardoso de Brito

Banca Examinadora:

- Crystopher Cardoso de Brito (Orientador)
- Denilson Paulo Souza dos Santos (Examinador)
- Vagner Candido de Sousa (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 042/2021)

São João da Boa Vista, 29 de agosto de 2022

RESUMO

Na indústria aeronáutica a fabricação de nervuras é uma etapa de extrema importância para uma aeronave atender às especificações de projeto. As nervuras das asas são os componentes que fornecem estrutura para asa combinando longarinas e reforçadores. As nervuras também são vistas nas superfícies de comando, sempre com o objetivo de manter o formato aerodinâmico desejado da asa ou superfície, além de amarrar os outros componentes estruturais da asa. O objetivo principal desta pesquisa foi estudar as diversas possibilidades de geometria e redução de peso dessas nervuras utilizando a manufatura aditiva e materiais compósitos. Procurou-se estudar as implicações de uma peça fabricada em manufatura aditiva no orçamento de um veículo aéreo não tripulado (VANT), comparando com materiais mais convencionais na indústria (Compensado naval, Ácido polilático e o Alumínio), fazendo simulações estruturais utilizando o método dos elementos finitos com três geometrias diferentes para comprovar suas capacidades estruturais, e assim estudou-se também sua viabilidade econômica. Notou-se que o Polietileno Tereftalato Glicol (PETG) + Fibra de carbono (FC) não se mostrou o melhor material para a fabricação das nervuras em situações cotidianas, diferente do compensado naval, sendo restrito o uso do PETG+FC a situações adversas, onde a possibilidade de imprimir a peça de reposição em horas, permita a reinserção da aeronave em operação.

PALAVRAS-CHAVE: Nervuras, Geometria, Peso, Manufatura Aditiva, VANT, Viabilidade Econômica.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Exemplo de discretização em triângulos e a convenção da numeração dos nós de um elemento triangular	12
Figura 2	Mapeamento das coordenadas do tetraedro(a) e o tetraedro “pai” mostrando um ponto P (não nó) no domínio físico	14
Figura 3	Geometria simples para material não metálico	18
Figura 4	Geometria simples pensada em estampagem para alumínio	18
Figura 5	Enfoque para as abas criadas na estampagem	18
Figura 6	Geometria um pouco mais complexa para materiais não metálicos	19
Figura 7	Nervura completa com a geometria central idêntica a geometria 3	19
Figura 8	Simulação com PLA	22
Figura 9	Tensões reais	22
Figura 10	Simulação com Alumínio	23
Figura 11	Simulação com a geometria para alumínio	23
Figura 12	Simulação com Compensado naval	24
Figura 13	PETG+FC solicitado a 5g	25
Figura 14	Distribuição de tensão encontrada na nervura de PLA	25
Figura 15	Simulação com compensado naval com a escala ajustada para a tensão de ruptura do compensado naval.	26
Figura 16	Resultado da simulação com PLA+FC	26
Figura 17	PLA com a geometria completa da nervura	27
Figura 18	Resultado com Compensado naval	28
Figura 19	Simulação de PETG+FC	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Módulo de Elasticidade do Compensado Naval	9
Tabela 2 – Tensão de Ruptura Compensado Naval	9
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas PLA	10
Tabela 4 – Propriedades Mecânicas PETG+FC	10
Tabela 5 – Propriedades Mecânicas Al	11
Tabela 6 – Índices de mérito	15
Tabela 7 – Matriz Comparação	21
Tabela 8 – Matriz Normalizada	21
Tabela 9 – Matriz Comparação 2:	21
Tabela 10 – Matriz Normalizada 2:	21
Tabela 11 – Tabela base para a criação das matrizes de comparação	29
Tabela 12 – Tabela de índice de mérito	29
Tabela 13 – Matriz de comparação de Índice de mérito para viga rígida	29
Tabela 14 – Matriz de comparação de índice de mérito para viga forte	29
Tabela 15 – Matriz comparação para o custo de materia prima	30
Tabela 16 – Matriz comparação para custo homem hora	30
Tabela 17 – Matriz comparação de custo de fabricação	30
Tabela 18 – Matriz comparação de acessibilidade ao ferramental.	31
Tabela 19 – Matriz de decisão para Viga rígida	31
Tabela 20 – Matriz de decisão para Viga forte	31
Tabela 21 – Pesos para o primeiro caso	32
Tabela 22 – Resultado da matriz de decisão para viga rígida	32
Tabela 23 – Resultado da matriz de decisão para viga forte	32
Tabela 24 – Matriz de comparação para viga rígida	33
Tabela 25 – Matriz de comparação para viga forte	33
Tabela 26 – Matriz de decisão para viga rígida	33
Tabela 27 – Matriz de decisão para viga forte	33
Tabela 28 – Pesos para o segundo caso	34
Tabela 29 – Resultado da matriz de decisão para viga rígida	34
Tabela 30 – Resultado da matriz de decisão para viga forte	34

SUMÁRIO

	Sumário	4
1	INTRODUÇÃO	6
2	OBJETIVOS	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
3.1	Materiais:	8
3.1.1	Compensado naval:	9
3.1.2	Poliácido lático:	9
3.1.3	PETG+FC:	10
3.1.4	Alumínio:	10
3.2	Elementos finitos:	11
3.2.1	ELEMENTO TRIANGULAR:	11
3.2.2	ELEMENTO TETRAEDRICO	13
3.3	Índice de Mérito	14
3.4	Método AHP	15
4	METODOLOGIA	17
4.1	SIMULAÇÃO:	17
4.1.1	CARGAS CONSIDERADAS:	17
4.1.2	DESENHO:	17
4.1.2.1	Geometria 1:	17
4.1.2.2	Geometria 2:	18
4.1.2.3	Geometria 3:	18
4.1.2.4	Variação :	19
4.1.3	PROCESSO PARA SIMULAÇÃO:	19
4.2	ANÁLISE ECONOMICA:	20
4.2.1	Matriz de decisão:	21
5	RESULTADOS:	22
5.1	Resultado Estrutural:	22
5.1.1	Geometria 1:	22
5.1.1.1	PLA:	22
5.1.1.2	Alumínio:	23
5.1.1.3	Compensado Naval:	24
5.1.1.4	PETG+FIBRA DE CARBONO	24
5.1.2	NOVA GEOMETRIA:	25

5.1.2.1	PLA + Nova geometria:	25
5.1.2.2	Compensado Naval:	26
5.1.2.3	PETG+Fibra de carbono:	26
5.1.3	Nervura Completa:	27
5.1.3.1	PLA Completo:	27
5.1.3.2	Compensado Naval Completo:	27
5.1.3.3	PETG+FC:	28
5.2	Economia:	28
5.2.1	Matrizes de Comparação para os índices de mérito que desconsideram o preço por quilo do material (C_m)	29
5.2.1.1	Índice de mérito para viga rígida e viga forte	29
5.2.1.2	Custo de Materia Prima	30
5.2.1.3	Custo Homem Hora	30
5.2.1.4	Custo de Fabricação	30
5.2.1.5	Ferramental	31
5.2.2	Matriz de decisão para o caso de índice de mérito que desconsidera o preço do material por quilo (C_m)	31
5.2.2.1	Resultados das matrizes de decisão	32
5.2.3	Matrizes de Comparação para os índices de mérito que consideram o preço por quilo do material (C_m)	32
5.2.3.1	Índice de mérito para viga rígida e viga forte	32
5.2.4	Matriz comparação para o caso de índice de mérito que considera o preço do material por quilo (C_m)	33
5.2.4.1	Resultados das matrizes de decisão	34
6	CONCLUSÃO	35
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Em um projeto de uma aeronave, as nervuras possuem duas finalidades de extrema importância na fabricação de uma superfície aerodinâmica, que são fornecer o formato do perfil aerodinâmico e também suportar as cargas de torção da asa, além de unir as longarinas e reforçadores (DHARMENDRA et al., 2020).

Historicamente, diversos materiais foram utilizados para a confecção dessas nervuras, tais como madeira, (que no Demoiselle de Santos Dumont eram varetas), alumínio, (que hoje em dia é usado na maioria das aeronaves da aviação geral), e nervuras em materiais compósitos, (como fibra de vidro, fibra de carbono e kevlar, que são utilizados nas aeronaves comerciais mais recentes e em muitos VANTS de alto desempenho).

A utilização de materiais compósitos na aviação é uma prática muito comum, tendo sido iniciada na década de 40, durante a segunda guerra mundial na fuselagem dos bombardeiros B-29, e em 2005, aproximadamente 35% das aeronaves fabricadas nos Estados Unidos eram de materiais compósitos (Hangar 33, 2015)

A laminação de fibras para componentes primários de aeronaves é amplamente difundido e utiliza matrizes termofixas, em sua maioria a resina epoxy. Já para uma impressora de *Fused deposition modeling* (FDM) funcionar, ela depende de que o filamento derreta e posteriormente se solidifique para obter a geometria desejada, classificando esse tipo de matriz como termoplástica, o que limita sua aplicação a componentes que não sejam expostos a calor.

Atualmente, observa-se que a manufatura aditiva tem aumentado sua participação na produção de peças e componentes para diversas aplicações da indústria aeronáutica, porém raramente em aplicações estruturais

Com a disseminação e o barateamento do processo de impressão 3d por deposição de filamento derretido, sua utilização na engenharia, e em especial nas indústrias aeroespaciais e aeronáutica, é cada vez mais comum, e visto que a capacidade de incorporar geometrias complexas sem custo adicional com ferramental, e a possibilidade de utilização de diversos filamentos com características mecânicas interessantes estruturalmente, devido ao avanço no desenvolvimento desse mercado, torna a impressão de peças estruturais cada vez mais viável economicamente.

Assim observa-se que a necessidade da indústria aeronáutica em otimizar estruturas, e o avanço da tecnologia de materiais e processos na impressão 3d convergem no presente estudo. Deste modo, este estudo pretende alinhar as expectativas mecânicas e econômicas da indústria aeronáutica com relação aos componentes estruturais fabricados a partir de filamentos compostos de fibra de carbono, mais especificamente de nervuras de asas.

Os estudos propostos foram a simulação de uma nervura impressa em 3D no software SimScale, utilizando o método dos Elementos Finitos com dois filamentos (PLA e PETG+FC), alumínio, e compensado naval, e também, alterando geometrias a fim de obter uma estrutura viável, e através do método AHP utilizando índices de mérito, buscar o material ideal tanto no âmbito estrutural, quanto financeiro.

2 OBJETIVOS

Objetivo geral:

Estudar diferentes métodos e geometrias de nervuras de asas para VANTS utilizando manufatura aditiva e métodos mais tradicionais e estudar sua viabilidade econômica.

Metas:

- Obter uma geometria com geometria viável, e passível de ser construída;
- Realizar simulação estrutural utilizando o software SimScale;
- Realizar o estudo de viabilidade econômica da peça fabricada a partir de manufatura aditiva com fibra de carbono. uma

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em termos de pesquisa sobre impressão 3D, temos duas grandes áreas de pesquisa,. A primeira área é a tentativa de aumentar a velocidade de impressão dos métodos de impressão atuais , melhorando a qualidade das peças fabricadas por métodos existentes. Melhorias nessa área aumentam a viabilidade da utilização de peças fabricadas em impressão 3D e torna a manufatura aditiva umas tecnologia de manufatura viável para uma vasta quantidade de peças na engenharia. Essa área de pesquisa inclui desenvolver novos métodos de impressão 3D que podem desenvolver peças com melhor qualidade ou tempo de impressão reduzidos. A segunda grande área é o desenvolvimento de novos materiais que possam ser incorporados nos métodos de manufatura aditiva atuais. Aumentando os tipos de materiais que possam ser usados na impressão 3D, também aumenta a viabilidade econômica das peças impressas em 3D para a indústria .

Atualmente, os métodos de impressão 3D podem produzir peças utilizando materiais que variam dos termoplásticos, até cerâmicas e metais, também incluindo os materiais compósitos. *Fibre reinforced thermoplastics e carbon fibre reinforced thermoplastics* (FRTP e CFRTP) são desejadas devido as suas propriedades mecânicas providas pelas fibras adicionadas na matriz, essa adição de fibras aumenta a resistência a tração e aumenta a razão resistência/peso quando comparados a materiais tradicionais O tamanho da fibra também importa na relação de resistência, o método mais comum é impregnar a fibra com a matriz antes da impressão, assim o filamento vem com fibras antes da impressão. Dessa maneira o filamento já com as fibras é passado pelo bico extrusor, e ao aquecer o filamento acima do ponto de transição, o filamento é depositado na mesa de impressão já com as fibras curtas impregnadas.

3.1 MATERIAIS:

Utilizando os seguintes materiais para realizar a análise estrutural e comparativa:

- Compensado naval;
- PLA;
- PETG + Fibra de Carbono;
- Alumínio.

Esses materiais foram escolhidos para realizar a análise estrutural pois o compensado naval e o alumínio são materiais amplamente utilizados em drones de grande porte. O PLA e o PETG+FC foram escolhidos pois, o primeiro é o material mais difundido na manufatura aditiva, já o segundo é um material que possui ótimas características mecânicas e maior resistência as intempéries que o PLA

Dessa forma, as propriedades mecânicas dos materiais escolhidos serão apresentadas a seguir.

3.1.1 Compensado naval:

O compensado naval é amplamente utilizado na construção civil, dado seu baixo preço e boas propriedades mecânicas, boas propriedades contra intempéries quando não deixado imerso em água, e facilidade no manuseio do material.

Como o próprio nome diz, o compensado naval também é utilizado na fabricação de barcos, que com o auxílio de materiais compósitos para conferir maior resistência, produz uma ótima estrutura, resistente mecanicamente e resistente a água.

Na fabricação artesanal de aviões e aeromodelos, o compensado naval é bastante utilizado como o material para a fabricação das nervuras das asas, devido ao seu baixo peso em comparação aos outros materiais e boas características mecânicas, além do fato de poder ser cortado a laser no formato exato do perfil.

De acordo com (SOUZA, 2019) temos os seguintes valores para módulo de elasticidade e tensão de ruptura:

Tabela 1 – Módulo de Elasticidade do Compensado Naval

Grupo	$4E_{m,i,mean}$ (MPa)	Desvio padrão (MPa)
Fibra Longitudinal (0°)	3359,983	326,907
Fibra Transversal(90°)	2061,594	263,285

fonte:(SOUZA, 2019)

Tabela 2 – Tensão de Ruptura Compensado Naval

Grupo	$f_{m,i,mean}$ (MPa)	Desvio padrão (MPa)	$f_{m,i,k}$ (MPa)
Fibra Longitudinal	29,332	2,907	25,815
Fibra Transversal	25,661	2,570	22,255

fonte: (SOUZA, 2019)

O valor característico da resistência à flexão ($f_{m,i,k}$) foi obtido a partir da distribuição estatística de forma a ser menor que 95% dos valores representativos da amostra.(SOUZA, 2019)

Para simular as deformações, durante o setup da simulação foi utilizado um valor de módulo de Young $E = 3359,983$ MPa para o compensado naval devido as orientações das fibras na madeira, e uma tensão de ruptura $f = 25,815$ MPa

3.1.2 Poliacido láctico:

O PLA é o material mais utilizado para impressão 3d atualmente, e essa popularidade deve-se ao fato de ser extremamente simples a impressão desse material, aliado ao seu apelo ecológico, por ser um material biodegradável, e sua baixa deformação durante a impressão. Existem diversos tipos de PLA disponíveis no mercado, com diferentes propriedades mecânica, resistências a solventes e radiação UV, mas para ser o mais representativo possível, será considerado nesse trabalho o tipo mais comum de PLA, comumente usado para prototipagem, impressões amadoras e educativas. Segundo o datasheet disponibilizado pela Ultimaker (ULTIMAKER, 2022) temos as seguintes propriedades mecânicas relevantes para a simulação:

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas PLA

Propriedades	Valor Típico
Modulo de elasticidade tração	2346,5 MPa
Tensão de escoamento de tração	49,5 MPa
Tensão de escoamento flexão	103 MPa
Modulo de elasticidade flexão	3150 MPa

fonte: (ULTIMAKER, 2022)

E para fim de simulação, o limite de resistência a tração será considerada $\sigma_u = 49.5$ MPa, já que nos elementos treliçados das nervuras podem aparecer cargas de tração somente, e $E = 2346,5$ MPa pelo mesmo motivo antes citado.

3.1.3 PETG+FC:

O PETG + FC 20% é considerado um material simples de imprimir, muito similar ao PLA, necessitando de algumas modificações no setup da máquina somente, já que também é um material livre de empenamentos durante a impressão de modo geral. Por ser um material que possui fibra de carbono em sua composição, tende a ser um filamento mais resistente a tensão de tração e flexão que os demais materiais populares na impressão 3D. A fibra de carbono também é capaz de enrijecer a peça final, possuindo um módulo de elasticidade maior que os demais materiais também.

De acordo com o datasheet da trak machine tool (TRAK, 2021) tem-se as seguintes propriedades relevantes para as simulações.

Tabela 4 – Propriedades Mecânicas PETG+FC

Tensão de escoamento	56 MPa
Modulo de elasticidade tração	5230 MPa
Modulo de flexão	5740 MPa
Tensão máxima de flexão	80 MPa

fonte: (TRAK, 2021)

Desse modo foi considerado a tensão de escoamento como o limite de resistência a tração $\sigma_u = 56$ MPa para manter a coerência em relação aos outros materiais, e utilizando também o módulo de Young $E = 5230$ MPa

3.1.4 Alumínio:

O alumínio é o material que provavelmente foi feito o maior número de nervuras de asas na história da aviação, já que com a simplicidade que se estampa uma nervura de alumínio, é muito viável para produção em larga escala. Sendo um material extremamente comum, as propriedades da liga 6061 T6 será utilizada para fins de cálculo, pois é uma liga amplamente utilizada na indústria aeronáutica e suas propriedades já foram muito testadas tanto em laboratório, quanto na prática. Dessa forma, as seguintes propriedades são apresentadas na tabela :

Tabela 5 – Propriedades Mecânicas Al

Limite de escoamento	240 MPa
Modulo de elasticidade	70 GPa
Limite de resistência a tração	260 MPa
fonte: (EMPORIO DOS METAIS, 2019)	

Sendo considerado o limite de escoamento como o limite de resistência a tração $\sigma_u = 240MPa$ e modulo de Young $E = 70GPa$ (EMPORIO DOS METAIS, 2019)

3.2 ELEMENTOS FINITOS:

Como foi utilizado um software comercial para realizar as simulações, a teoria de elementos finitos se resumirá aos tipos de nós que serão utilizados durante as simulações e o significado dos resultados encontrados. Já que durante a simulação pelo software SimScale serão usados apenas dois tipos de elementos , sendo eles o tetraédrico e o triangular, será apresentado apenas esses dois tipos na introdução teórica.

3.2.1 ELEMENTO TRIANGULAR:

O elemento triangular de três nós é um dos elementos bidimensionais mais versáteis e simples. Ele pode representar quase qualquer geometria sem muita dificuldade , construir malhas que possuem mais elementos em áreas de maiores gradientes, de modo que malhas triangulem obtenham maior precisão com o mesmo numero de elementos. Por esses motivos, os geradores de malha para malhas triangulares são os mais robustos, tendendo a cometer menos erros. Essa é uma grande vantagem , já que um gerador de malha robusto é essencial para a solução de problemas complexos por meio de elementos finitos Uma desvantagem do triangulo de três nós é que ele é um elemento relativamente impreciso e não é recomendado para análises de produção com softwares de elementos finitos.

Uma solução tentativa usada em cada elemento triangular é aproximada a uma função linear das coordenadas espaciais x e y (FISH; BELYTSCHKO, 2007)

$$\theta^e(x, y) = \alpha_0^e + \alpha_1^e x + \alpha_2^e y \quad (1)$$

Sendo α_i^e parâmetros arbitrários, podendo ser escrito na seguinte forma matricial:

$$\theta^e(x, y) = \alpha_0^e + \alpha_1^e x + \alpha_2^e y = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0^e \\ \alpha_1^e \\ \alpha_2^e \end{bmatrix} = p(x, y)\alpha^e \quad (2)$$

Com:

$$p = \begin{bmatrix} 1 & x & y \end{bmatrix} \quad (3)$$

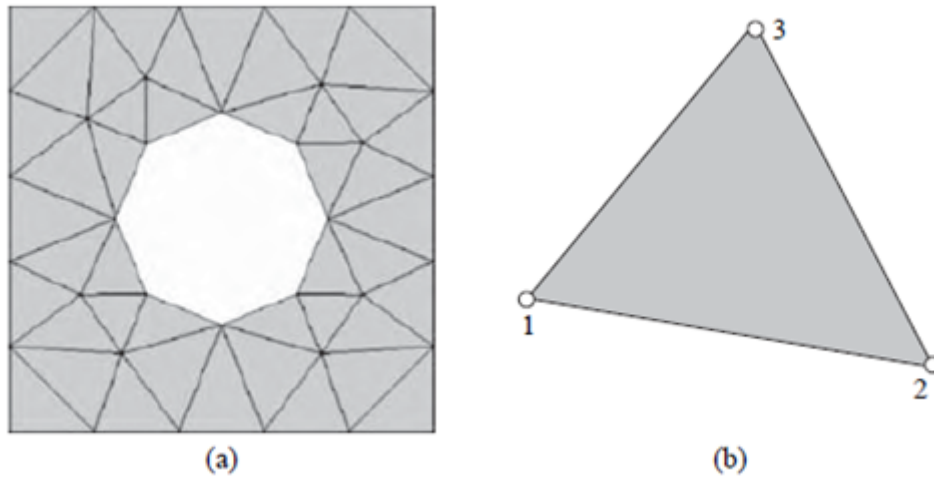


Figura 1 – Exemplo de discretização em triângulos e a convenção da numeração dos nós de um elemento triangular

E:

$$\alpha^e = \begin{bmatrix} \alpha_0^e \\ \alpha_1^e \\ \alpha_2^e \end{bmatrix} \quad (4)$$

Assim percebe-se que por acaso o número de parâmetros que descrevem o campo completamente linear $\alpha^e(x, y)$ em um elemento triangular é igual ao número de nós, então podemos expressar os parâmetros α_i^e em termos dos valores nodais θ_i^e . Se fossem menos nós que constantes ou o inverso, uma única expressão em termos dos valores nodais não seria possível. Partindo da equação (4), construímos as funções de forma para os elementos, portanto primeiramente expressamos os valores nodais $\theta^e(x_1^e, y_1^e) = \theta_1^e, \theta^e(x_2^e, y_2^e) = \theta_2^e, \theta^e(x_3^e, y_3^e) = \theta_3^e$ em termos dos parâmetros $(\alpha_0^e, \alpha_1^e, \alpha_2^e)$ e escrever na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \theta_1^e \\ \theta_2^e \\ \theta_3^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1^e \\ \alpha_2^e \\ \alpha_3^e \end{bmatrix} \quad (5)$$

Onde :

$$\begin{bmatrix} \theta_1^e \\ \theta_2^e \\ \theta_3^e \end{bmatrix} = \mathbf{d}^e, \begin{bmatrix} 1 & x_1^e & y_1^e \\ 1 & x_2^e & y_2^e \\ 1 & x_3^e & y_3^e \end{bmatrix} = \mathbf{M}^e, \begin{bmatrix} \alpha_1^e \\ \alpha_2^e \\ \alpha_3^e \end{bmatrix} = \alpha^e \quad (6)$$

Então podemos escrever:

$$\mathbf{d}^e = \mathbf{M}^e \alpha^e. \quad (7)$$

Isolando α^e e substituindo em (2), obtemos:

$$\theta^e(x, y) = p(x, y)(\mathbf{M}^e)^{-1} \mathbf{d}^e \quad (8)$$

O produto de matriz que precede d^e nos da as funções de forma:

$$N^e(x, y) = p(x, y)(M^e)^{-1} \approx \begin{bmatrix} N_1^e(x, y) & N_2^e(x, y) & N_3^e(x, y) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Desenvolvendo algebricamente o problema, temos:

$$N_1^e = 1/(2A^e)(x_2^e y_3^e - x_3^e y_2^e + (y_2^e - y_3^e)x + (x_3^e - x_2^e)y), \quad (10)$$

$$N_2^e = 1/(2A^e)(x_3^e y_1^e - x_1^e y_3^e + (y_3^e - y_1^e)x + (x_1^e - x_3^e)y), \quad (11)$$

$$N_3^e = 1/(2A^e)(x_1^e y_2^e - x_2^e y_1^e + (y_1^e - y_2^e)x + (x_2^e - x_1^e)y). \quad (12)$$

Sendo :

$$2A^e = \det(M^e) \quad (13)$$

E A , a área do triângulo.

Nota-se que as funções formas são lineares em x e y e os coeficientes de todos os monomiais dependem das coordenadas nodais (FISH; BELYTSCHKO, 2007)

3.2.2 ELEMENTO TETRAEDRICO

As duas categorias básicas de elementos tridimensionais são os elementos hexaédricos e os elementos tetraédricos, já que somente será abordado o tetraedro, temos que o tetraedro é uma generalização dos elementos triangulares. Na categoria de tetraedros, temos que o mínimo número de nós possíveis são quatro e também com ordens maiores de nós que podem fornecer faces curvas ou planas. As coordenadas tetraédricas de um ponto P são denotadas por ξ_1, ξ_2, ξ_3 e ξ_4 , As coordenadas tetraédricas definem as coordenadas volumétricas do tetraedro. Qualquer ponto P no domínio do elemento físico subdivide o volume original do elemento tetraédrico em 4 tetraedros. As coordenadas volumétricas são definidas como:

$$\xi_1 = \text{volume de } P234 / \Omega^e \quad (14)$$

$$\xi_2 = \text{volume de } P134 / \Omega^e \quad (15)$$

$$\xi_3 = \text{volume de } P124 / \Omega^e \quad (16)$$

$$\xi_4 = \text{volume de } P123 / \Omega^e \quad (17)$$

Nota-se que com a definição acima, $\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4 = 1$

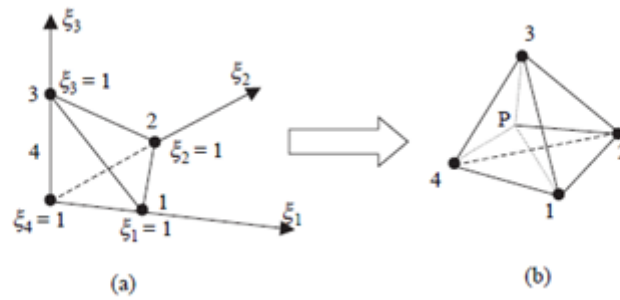


Figura 2 – Mapeamento das coordenadas do tetraedro(a) e o tetraedro “pai” mostrando um ponto P (não nó) no domínio físico

Cada coordenada é zero em uma superfície e igual a 1 no nó oposto a superfície. As funções forma para um elemento tetraédrico de quatro nós são dados por:

$$N_1^{4Tet} = \xi_1 \quad (18)$$

$$N_2^{4Tet} = \xi_2 \quad (19)$$

$$N_3^{4Tet} = \xi_3 \quad (20)$$

$$N_4^{4Tet} = \xi_4 = 1 - \xi_1 - \xi_2 - \xi_3 \quad (21)$$

As fórmulas de integração para o tetraedro são similares as formulas de integração do elemento triangular.

Os resultados das simulações, se a nervura possuir a mesma geometria com diferentes materiais, as tensões máximas observadas devido ao carregamento serão aproximadamente as mesmas, visto que mesmo possuindo alongamentos diferentes, a diferença da área transversal entre os diferentes materiais será pequena demais, já que todas as tensões máximas permitidas foram as tensões de escoamento. A grande diferença será a deformação total causada pelo carregamento e sua devida escala no momento de apresentação dos resultados, e os ajustes de escala de cores no momento da visualização da distribuição de carga na peça (FISH; BELYTCHKO, 2007).

3.3 INDICE DE MÉRITO

Para escolher um material ideal para uma dada aplicação, normalmente é utilizado o seguinte algoritmo apresentado por (ASHBY, 2005):

Triagem: limites de atributos:

A seleção imparcial exige que todos os materiais sejam considerados candidatos até que seja mostrado o contrário. Como exemplo, o requisito de que, “o componente deve ser transparente” impõe limites óbvios ao atributo de transparência óptica que os candidatos aprovados devem cumprir. Referimo-nos a estes como limites de atributos.

Classificação: Índice de mérito:

Limites de atributos não ajudam, a ordenar os candidatos que permanecerem. Para fazer isso, precisamos de critérios de otimização. Eles são encontrados no índice de mérito, desenvolvidos abaixo, que medem quão bem um candidato que passou na etapa de triagem pode fazer o trabalho. O desempenho às vezes é limitado por uma única propriedade, às vezes por uma combinação delas. Como exemplo, pode-se ter que os melhores materiais para fluabilidade são aqueles com a menor densidade; os melhores para isolamento térmico aqueles com os menores valores de condutividade térmica,

Maximizar ou minimizar uma única propriedade maximiza a atuação. Como exemplo, também, os melhores materiais para um tirante leve e rígido são aqueles com o maior valor da rigidez específica, E/ρ , onde E é Módulo de Young. Os melhores materiais para uma mola são aqueles com maior valor de $2f/\sigma_y$, e onde f é a tensão de ruptura. A propriedade ou grupo de propriedades que maximiza o desempenho para um determinado projeto é chamado de índice de mérito

Existem muitos desses índices, cada um associado à maximização de algum aspecto de desempenho, fornecendo critérios de excelência que permitem a classificação de materiais por sua capacidade de ter um bom desempenho na aplicação dada.

Os índices de méritos usados, são vistos na seguinte tabela de índices, mostrada em (ASHBY, 2005)

Exemplos de índices de mérito	
Função, objetivo e restrição	Índice
Treliça, mínimo peso, rigidez	E/ρ
Viga, mínimo peso, rigidez	$E^{1/2}/\rho$
Viga, mínimo peso, resistência	$\sigma_y^{2/3}/\rho$
Viga, mínimo custo, rigidez	$E^{1/2}/C_m\rho$
Viga, mínimo custo, resistência	$\sigma_y^{2/3}/C_m\rho$
Coluna, mínimo peso, carga de flambagem	$E^{1/2}/C_m\rho$

Tabela 6 – Índices de mérito

Para contextualizar no problema do presente trabalho, os índices de mérito que o carregamento da nervura sugere são:

- Viga, menor peso, resistência
- Viga, menor custo, resistência

3.4 MÉTODO AHP

O AHP é um método de análise multicritério que permite incluir todos os fatores importantes, tangíveis ou intangíveis, que podem ser expressos qualitativa ou quantitativamente (SAATY, 1980). O AHP é um sistema para análise e síntese de problemas complexos que permite justificar as decisões de um problema de forma isolada. O tomador de decisão julga a importância de cada critério em uma seqüência de comparações entre pares de critério. O mesmo procedimento é aplicado para julgar o mérito de cada solução sob um dado critério. Além disso, o AHP permite que a experiência da pessoa (projetista) ou do avaliador seja aplicada, pois, ela é tão valiosa quanto os dados numéricos disponíveis,

num processo de tomada de decisão (ALMEIDA, 2002). O método AHP consiste em quatro etapas básicas (GARBER, 2002):

- estruturação do problema com a especificação dos objetivos, a definição dos critérios que serão utilizados na avaliação e a identificação das alternativas oferecidas como solução;
- determinação de preferências através de comparações paritárias, ou seja, comparações entre cada par de fatores de decisão, subdividido em objetivos, critérios e alternativas;
- síntese e determinação de prioridade relativa ou peso de cada elemento de decisão, em um dado nível, usando o método de consolidação dos valores atribuídos aos fatores;
- agregação das prioridades relativas para a escolha final.

O método fundamenta-se na comparação dos elementos dois a dois. A partir da construção de uma matriz quadrada avalia-se a importância de um elemento (critério ou alternativa) em relação a outro, estabelecendo, pois, uma hierarquia.

A matriz de comparação, construída para definir as preferências entre os elementos do processo de avaliação, é portanto uma matriz quadrada, cujas características estão mostradas (ALMEIDA, 2002).

Os termos da matriz de comparação devem atender as seguintes condições:

- $A_{ij} > 0$ (todos os elementos positivos);
- $A_{ij} = 1$ (todos os elementos da diagonal principal são iguais a 1, comparação entre iguais);
- $A_{ij} = 1/A_{ji}$ (consistência na comparação).

Observa-se que a intensidade dessas preferências deve satisfazer a condição de reciprocidade, como expressa pela última relação acima: se A é x vezes preferível que B, então B é 1/x vezes preferível que A. (UNESP, -).

Com a análise feita pelo método AHP, conseguimos então assertivamente escolher o material ideal para uma dada aplicação, sem negligenciar a experiência do engenheiro ou julgador.

4 METODOLOGIA

A metodologia proposta baseia-se no estudo das diferentes nervuras projetadas para diferentes materiais por meio do software SimScale, e com os resultados das simulações, saber se o PLA+FC é viável economicamente e em qual situação o uso desse material é o ideal

Desse modo a metodologia será dividida em duas partes:

- Simulação;
- Viabilidade econômica.

4.1 SIMULAÇÃO:

4.1.1 CARGAS CONSIDERADAS:

Para fim de simplificar os cálculos de cargas, foi desconsiderada a perda de sustentação nas pontas das asas (SATHAYE, 2004), e com um peso máximo de decolagem de 150 kg, a aeronave deve ser capaz de suportar uma aceleração positiva de 5g. Considerando uma carga distribuída em 7 nervuras por asa (uma delas na ponta da asa, podendo ser ignorada a fim de cálculo estrutural), durante uma manobra de 5G, uma carga de aproximadamente 62,5 kg, ou 613.12 N é considerada apenas na face do intradorso de cada nervura, já que a maior pressão será suportada por essa parte da nervura. Os pontos de fixação da nervura se localizam a 20% e 70% da corda do aerofólio, por onde duas longarinas passam. Nesse estudo, tanto a flexão das longarinas, quanto o material das longarinas, fixação entre longarina e nervura foram desconsiderados, já que o objeto de estudo é apenas a nervura. Assim podemos observar nas figuras seguintes os diferentes modelos de nervuras simulados e suas justificativas quanto as escolhas de geometria para cada material.

4.1.2 DESENHO:

Utilizando o Software de CAD SolidWorks, foram projetadas 3 nervuras genéricas e mais uma variação, considerando diferentes processos de fabricação de cada nervura, utilizando os respectivos materiais, vale ressaltar que os desenhos foram feitos sem nenhum tipo de otimização estrutural, utilizando apenas o censo comum e modelos já existentes como base para a criação de uma nervura genérica de um tamanho compatível ao de um drone capaz de decolar em pistas curtas, possuir uma baixa velocidade de estol e com um peso máximo de decolagem de 150kg.

4.1.2.1 Geometria 1:

Foi escolhida tal geometria, pois sua simplicidade de modelamento e fabricação se sobrepõe as possíveis desvantagens estruturais.

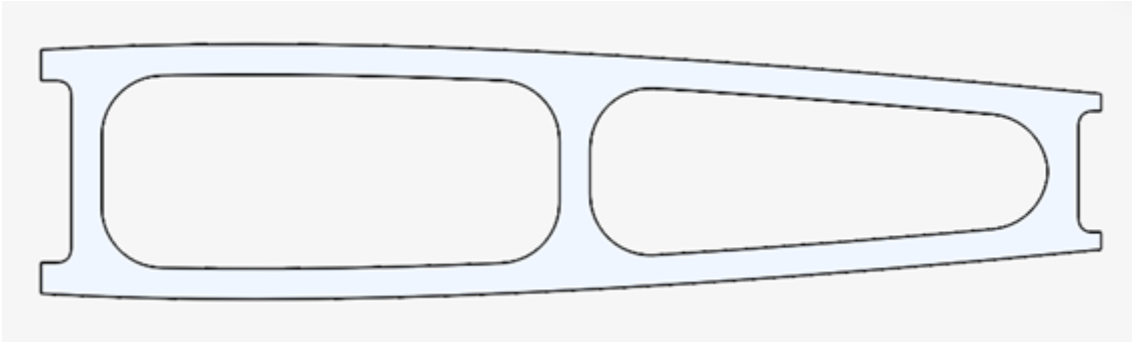


Figura 3 – Geometria simples para material não metálico

4.1.2.2 Geometria 2:

Essa geometria foi nada além de uma adaptação da geometria 1 para a manufatura por estampagem em alumínio, visto que sua espessura é menor e possui as abas para fixação no chapeamento da asa, ou na entelagem.

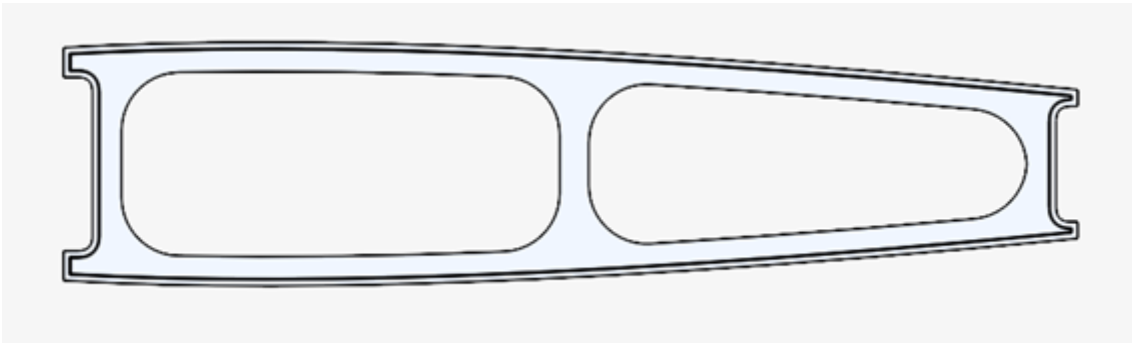


Figura 4 – Geometria simples pensada em estampagem para alumínio

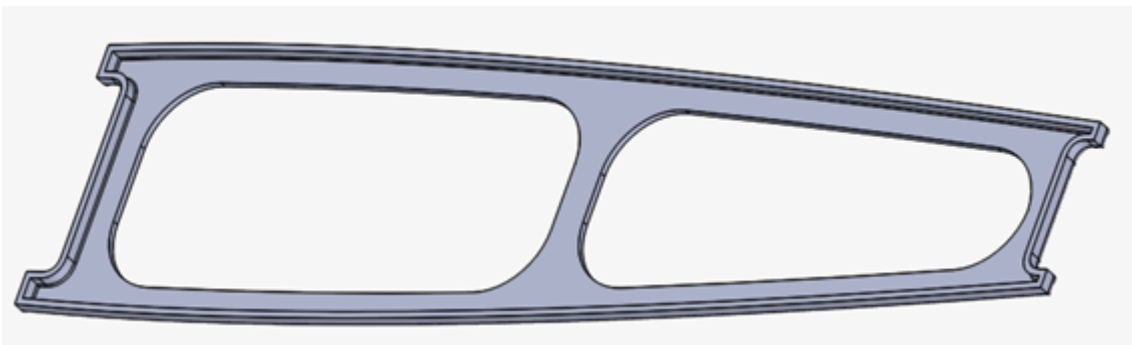


Figura 5 – Enfoque para as abas criadas na estampagem

4.1.2.3 Geometria 3:

A geometria 3 foi pensada para casos em que a complexidade não é fator limitante, já que possui diversos raios diferentes e uma estrutura que lembra uma treliça, pensada principalmente para a manufatura aditiva.

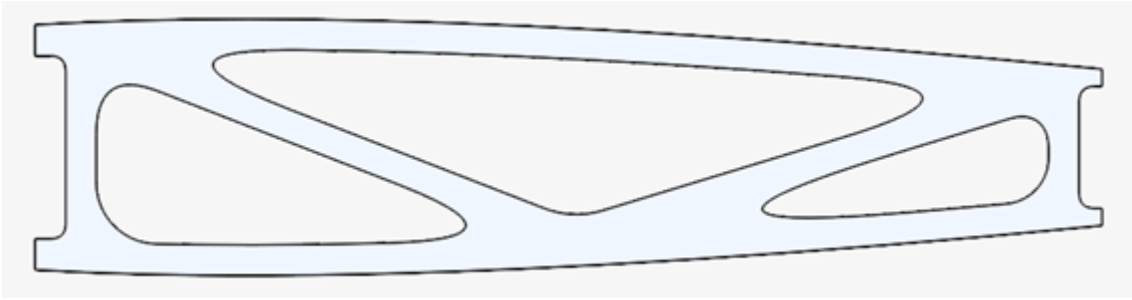


Figura 6 – Geometria um pouco mais complexa para materiais não metálicos

4.1.2.4 Variação :

A variação da geometria 3 foi criada como prova de conceito, considerando dessa vez uma nervura completa com o perfil NACA 0012, assim como as anteriores, mas com bordo de ataque e bordo de fuga.

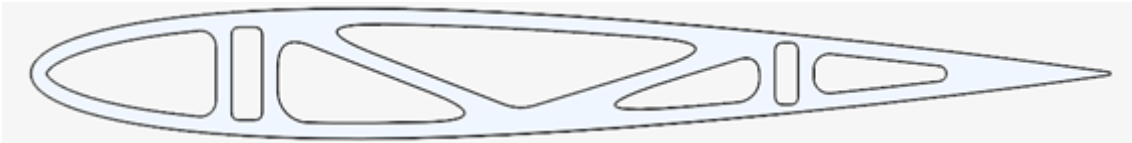


Figura 7 – Nervura completa com a geometria central idêntica a geometria 3

4.1.3 PROCESSO PARA SIMULAÇÃO:

Utilizando o método para estruturas estáticas e negligenciando as análises dinâmicas, pois a análise dinâmica nesse caso não é tão relevante para uma nervura somente, e sim para o conjunto completo da asa.

Após o modelamento da nervura, o processo de simulação no software SimScale iniciou-se com as nervuras mais convencionalmente utilizadas na indústria aeronáutica, que são as peças fabricadas de madeira (Compensado Naval) e alumínio, e posteriormente as nervuras menos convencionais fabricadas por manufatura aditiva, que seriam os componentes impressos em PLA e PETG+FC, visto que o PLA é um dos materiais mais difundidos na manufatura aditiva pelo processo FDM, e é válido a comparação do PLA simples, com sua variação adicionando fibras curtas de carbono.

Também é importante ressaltar que a impressão com fibra de carbono costuma ser mais custosa, não apenas pelo fato de ser usado um material mais nobre, mas também porque a infraestrutura necessária para a realização da impressão 3d é mais cara, já que material compósito de fibra de carbono é mais abrasivo, e conseqüentemente desgasta mais o bico extrusor, obrigando uma manutenção mais frequente e a aquisição de um bico confeccionado em ferro fundido, ou algum aço duro, diferente do material mais comum que é o latão.

Tendo como base os materiais mais comuns e suas características e deformações, podemos partir para os materiais menos convencionais, objetos de estudo desse trabalho e performar as mesmas simulações antes feitas, com as geometrias criadas pensando nesses novos materiais.

Nesse trabalho foi desconsiderado o acoplamento entre os problemas termodinâmicos e estruturais, visto que os softwares disponíveis que são capazes de realizar esses cálculos a partir do GCode (Código

lido pela impressora 3d), criado pelo slicer (programa utilizado para transformar um desenho sólido de CAD, para uma rotina que a impressora 3d é capaz de processar e interpretar), são licenciados.

4.2 ANÁLISE ECONOMICA:

Após a realização das simulações, será possível analisar cada caso e visualizar o material ideal para cada situação utilizando os seguintes critérios:

- Peso;
- Resistência;
- Custo de matéria prima;
- Custo homem-hora;
- Custo de fabricação
- Acessibilidade ao ferramental necessário.

Tendo as tensões sido calculadas durante as simulações, consegue-se fazer uma análise da viabilidade estrutural e econômica dos materiais utilizando o índice de mérito aplicável ao tipo de estrutura de uma nervura, sendo ela uma estrutura de viga rígida e forte, com o menor peso possível. Para tal análise, os índices de mérito são (ASHBY, 2005):

Viga rígida:

$$M_1 = E^{1/2} / \rho C_m \quad (1)$$

Viga forte:

$$M_2 = \sigma_f^{2/3} / \rho C_m \quad (2)$$

Nessa etapa da análise, o custo do material não será considerado, com o objetivo de deixar o resultado mais abrangente. O próximo passo será incluir o C_m , que é o custo por quilo do material, fazendo com que os índices de mérito sejam (ASHBY, 2005):

Viga rígida:

$$M_1 = E^{1/2} / \rho C_m \quad (3)$$

Viga forte:

$$M_2 = \sigma_f^{2/3} / \rho C_m \quad (4)$$

A adição desse coeficiente afunila os resultados, de forma que o material ideal não necessariamente seja o mais resistente, ou o mais rígido, mas sim o que cumpre os requisitos com o melhor custo-benefício. Com os coeficientes calculados, podemos então adicionar outros requisitos na matriz de decisão que são tão importantes quanto o índice de mérito, mas são considerados de maneira qualitativa, como por exemplo, o ferramental necessário para a confecção da peça.

4.2.1 Matriz de decisão:

A matriz de decisão será feita utilizando o método AHP. Segundo (SAATY, 1980) o AHP é um método de análise multicriterial que permite incluir todos os fatores importantes, sendo eles tangíveis ou não. Os critérios antes citados serão comparados dois a dois, atribuindo graus de importância entre os dois critérios, e assim auxiliando na escolha do material ideal.

Assim os pesos entre as características desejáveis da peça ficam para o caso em que o índice de mérito não considera o custo:

Tabela 7 – Matriz Comparação

	índice de mérito	Custo de matéria prima	Custo homem hora	Custo de fabricação	Ferramental
Índice de mérito	1	3	3	1	1/4
Custo matéria prima	1/3	1	2	1/5	1/4
Custo homem hora	1/3	1/2	1	1/2	1/7
Custo de fabricação	1	5	2	1	1
Ferramental	4	4	7	1	1
Totais	6,66	13,5	15	3,7	2,64

fonte: Autoria Própria

Tabela 8 – Matriz Normalizada

	índice de mérito	Custo de matéria prima	Custo homem hora	Custo de fabricação	Ferramental	Média Pesos totais
Índice de mérito	0,15	0,22	0,2	0,27	0,094	0,1868
Custo matéria prima	0,05	0,074	0,13	0,054	0,094	0,0804
Custo homem hora	0,05	0,037	0,066	0,135	0,054	0,0684
Custo de fabricação	0,15	0,37	0,13	0,27	0,378	0,2546
Ferramental	0,6	0,296	0,46	0,27	0,378	0,4008

fonte: Autoria Própria

Já para o índice de mérito que considera o custo do quilo do material temos as seguintes matrizes:

Tabela 9 – Matriz Comparação 2:

	índice de mérito	Custo homem hora	Custo de fabricação	Ferramental
Índice de mérito	1	7	4	1
Custo homem hora	1/7	1	1/2	1/7
Custo de fabricação	1/4	2	1	1
Ferramental	1	7	1	1
Totais	2,39	17	6,5	3,14

fonte: Autoria Própria

Tabela 10 – Matriz Normalizada 2:

	índice de mérito	Custo homem hora	Custo de fabricação	Ferramental	Média Pesos totais
Índice de mérito	0,42	0,411	0,61	0,32	0,44
Custo homem hora	0,059	0,0588	0,076	0,045	0,0597
Custo de fabricação	0,104	0,12	0,15	0,32	0,1735
Ferramental	0,42	0,411	0,15	0,32	0,3252

5 RESULTADOS:

Para apresentar os resultados de maneira mais clara, foi dividido em duas partes, que são os resultados das simulações estruturais e os resultados da análise de viabilidade econômica.

5.1 RESULTADO ESTRUTURAL:

5.1.1 Geometria 1:

Com a primeira geometria, foram realizadas as simulações com os seguintes materiais:

5.1.1.1 PLA:

Na Simulação com PLA , considerando a tensão de escoamento de 49,5 MPa durante a flexão, temos o seguinte resultado:

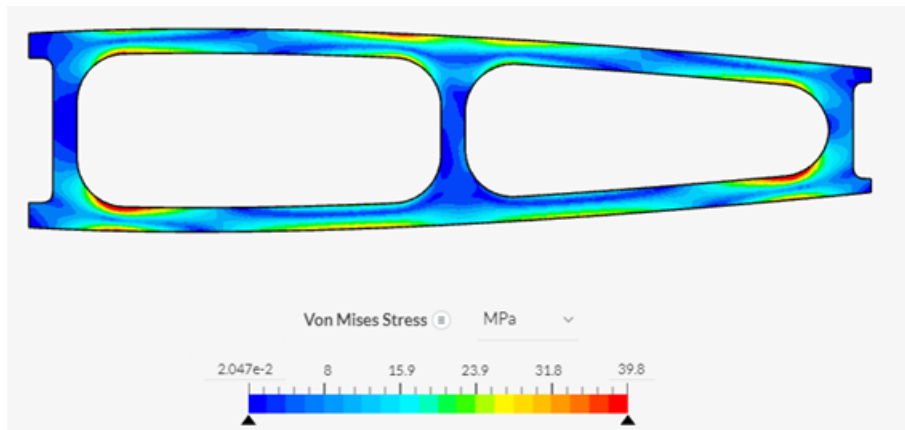


Figura 8 – Simulação com PLA

Dessa maneira observa-se que o material rompe, já que a máxima tensão encontrada superou os 61MPa (observado na próxima imagem). É fato que a geometria não otimizada foi a causa do rompimento.

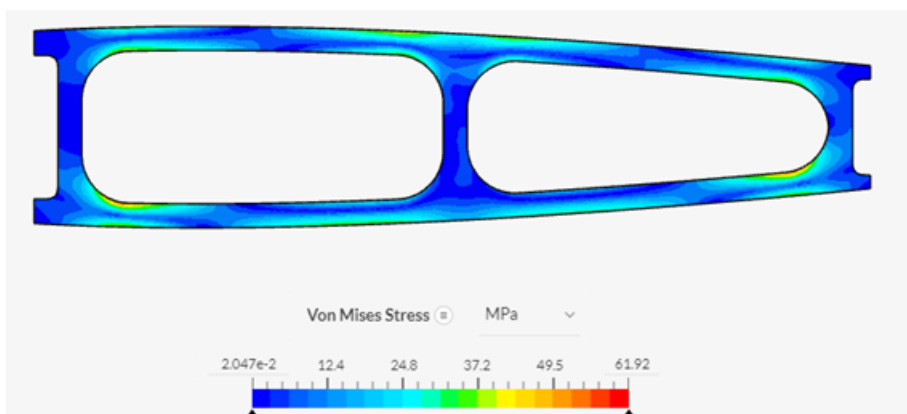


Figura 9 – Tensões reais

Aqui, ve-se que a tensão presente é de aproximadamente 63MPa, uma tensão que supera a tensão de escoamento do PLA

5.1.1.2 Alumínio:

Essa mesma geometria foi utilizada com o alumínio, e ao obter os resultados, observou-se que o alumínio era muito mais forte que o necessário, por isso foi utilizado uma outra geometria somente para o alumínio, de maneira que a simulação fosse mais representativa. Mesmo assim os resultados com a geometria 1 e o alumínio serão mostrados a fim de comparação. Considerando a tensão de escoamento do alumínio em 270 MPa, foi obtido o seguinte resultado:

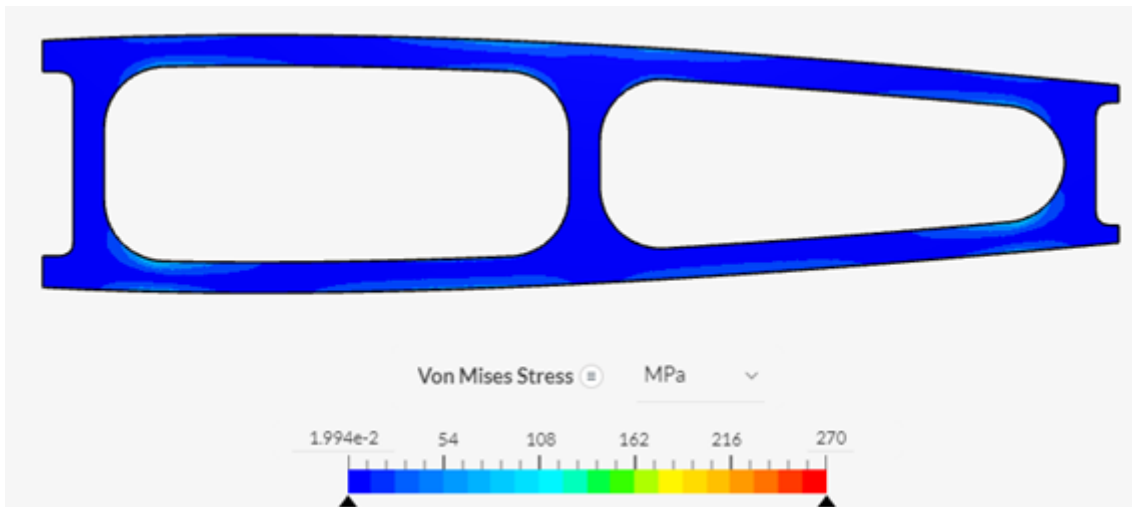


Figura 10 – Simulação com Alumínio

Em oposição a espessura de 6 milímetros presente na geometria 1, essa nervura possui uma espessura de 2 milímetros apenas, com bordas de 6 milímetros para fixar na chapa ou entelagem com uma mesma área.

A seguir tem-se os resultados da segunda simulação:

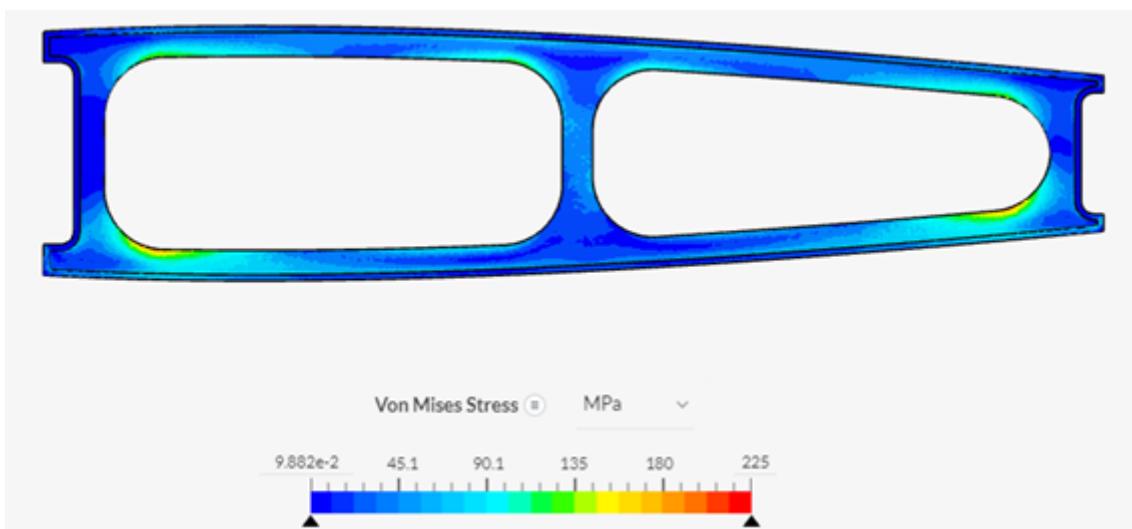


Figura 11 – Simulação com a geometria para alumínio

A máxima tensão observada na nervura de alumínio foi 225MPa , o que é dentro dos limites estruturais do alumínio, garantindo que mesmo em solicitação de 5g, a nervura de alumínio suportaria as cargas máximas sem escoar.

5.1.1.3 Compensado Naval:

O compensado naval foi testado, pois é o material de escolha de muitos drones de grande porte, pela simplicidade no momento do corte , e pelas propriedades da madeira que são muito convenientes, além do preço convidativo, mesmo não possuindo uma resistência excepcional. Considerando uma tensão máxima de ruptura, segundo de 25.81 MPa, observou-se o seguinte resultado

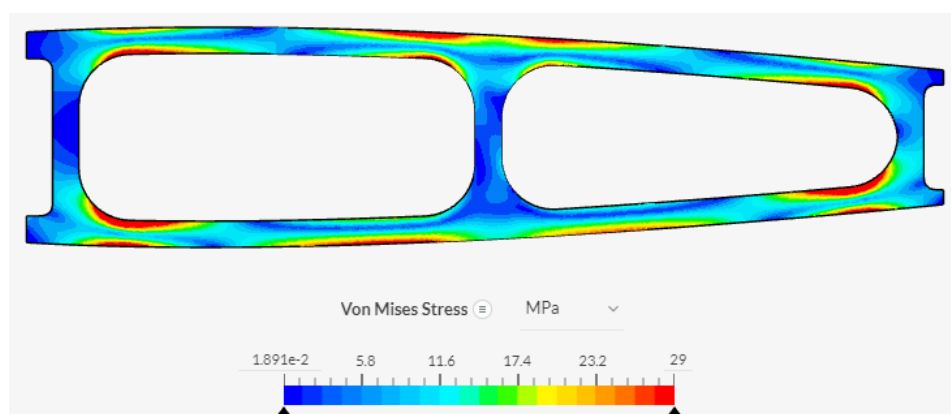


Figura 12 – Simulação com Compensado naval

Sabendo que a tensão máxima apresentada nessa geometria é superior a 62 MPa , observa-se que a nervura não foi capaz de suportar 5g.

5.1.1.4 PETG+FIBRA DE CARBONO

O PET + FC é utilizado quando é necessário uma peça com alta complexidade geométrica e com necessidade de alta resistência mecânica. Sendo um material composto de fibras curtas, ou seja, pequenos pedaços de fibra e pó de fibra de carbono, não é o mais resistente mecanicamente, porém comparado com o PLA , suas características mecânicas se sobrepõem.

Essa característica de fibra curta é necessária, pois uma fibra contínua não seria possível utilizar numa máquina de impressão 3d do tipo FDM, já que não é possível cortar a fibra durante a operação, e durante as movimentações entre camadas ficariam fios contínuos que destruiriam a geometria pretendida Com uma tensão de “escoamento” de 56 MPa.

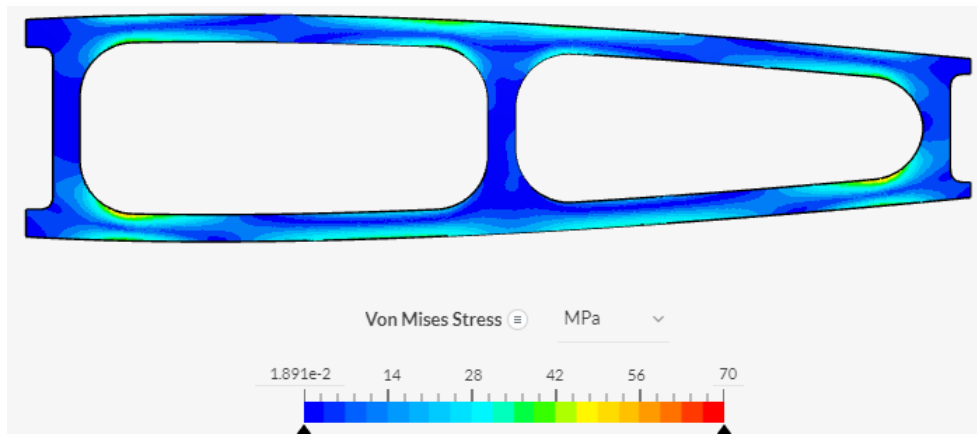


Figura 13 – PETG+FC solicitado a 5g

Percebe-se que o PETG com fibra de carbono não foi capaz de suportar a carga solicitada.

5.1.2 NOVA GEOMETRIA:

A necessidade de uma nova geometria mais resistente surgiu durante as primeiras simulações com os materiais mais fracos, visto que a primeira geometria não possuía características que favorecessem a madeira e os materiais de impressão 3D, visto que suas tensões de ruptura eram bem inferiores ao solicitado. Então com essa nova geometria foi possível reduzir a tensão máxima observada durante as simulações em quase três vezes, dando uma “chance” para os materiais cujas resistências a flexão e tração são inferiores e permitir uma comparação mais leal entre os materiais nos passos seguintes da pesquisa. Assim podemos observar os seguintes resultados encontrados com a geometria nova:

5.1.2.1 PLA + Nova geometria:

Com a nova geometria simulada e com as características do PLA antes citadas, podemos observar que nesse momento o PLA passa a ser mais viável, já que sua tensão de “escoamento” é mais adequada a solicitação, visto que a tensão máxima encontrada usando PLA e a nova geometria não passou de 22 MPa, considerando a resistência a flexão do PLA em aproximadamente 50MPa. A seguir, na figura abaixo é possível visualizar a distribuição de tensão encontrada na nervura, com uma escala de cores baseada na tensão de escoamento do PLA.

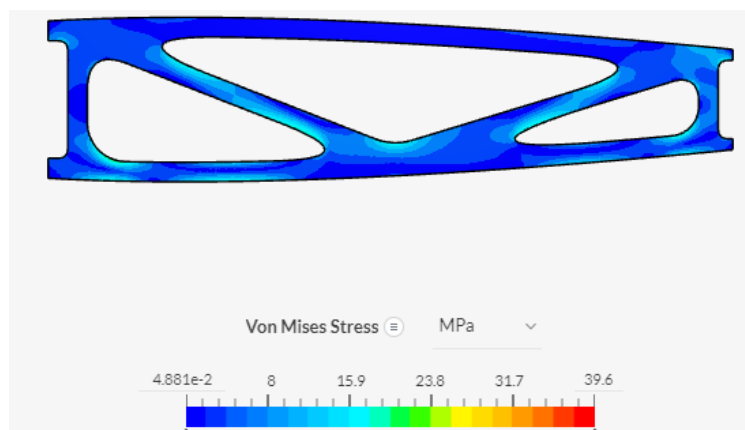


Figura 14 – Distribuição de tensão encontrada na nervura de PLA

Assim é confirmado que com uma nova geometria adequada o PLA ao uso em nervuras estruturais em asas de VANTs.

5.1.2.2 Compensado Naval:

Como anteriormente o compensado naval não foi capaz de suportar as cargas, foi adotado durante as novas simulações a nova geometria também visando aumentar sua rigidez e permitir seu uso nesse tipo de aeronave. Assim foi possível obter os seguintes resultados:

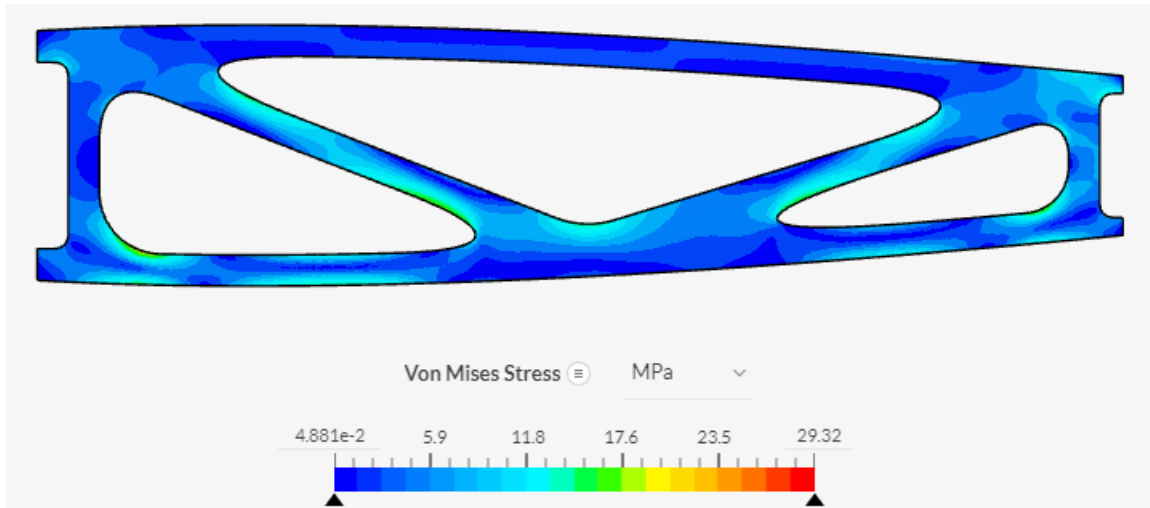


Figura 15 – Simulação com compensado naval com a escala ajustada para a tensão de ruptura do compensado naval.

Observando a imagem é possível notar que com uma geometria mais otimizada é possível utilizar o compensado naval em nervuras de asas, e ao juntar a resistência mecânica com as vantagens proporcionadas pela madeira.

5.1.2.3 PETG+Fibra de carbono:

Por ter falhado na primeira simulação, a nova geometria também foi empregada na simulação do PETG+FC

Desse modo, na figura abaixo observa o comportamento do PETG+FC

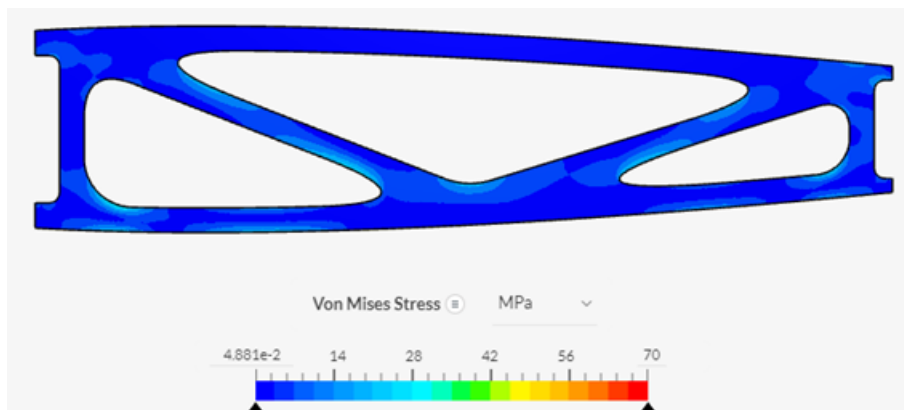


Figura 16 – Resultado da simulação com PLA+FC

Claramente é visível que o material sofre pouquíssimo com as cargas solicitadas, e com as características do PETG+FC, de resistência UV (PRINTERLY,), é capaz de suportar um ciclo de vida longo

5.1.3 Nervura Completa:

Para obter um resultado mais próximo da realidade, foi então modelada uma nervura completa, com os furos das longarinas e alívios genéricos no bordo de ataque e de fuga, porém com a região central idêntica a geometria da seção anterior. Dessa forma foram realizadas as mesmas simulações anteriores, porém com os pontos de fixação abrangendo toda a are interna dos furos das longarinas, e a força distribuída ao longo de todo o intradorso, distribuindo assim a mesma força em uma área maior.

5.1.3.1 PLA Completo:

Seguindo os mesmos passos anteriores, das outras simulações, foi feito o estudo de uma nervura completa em PLA, com os seguintes resultados:

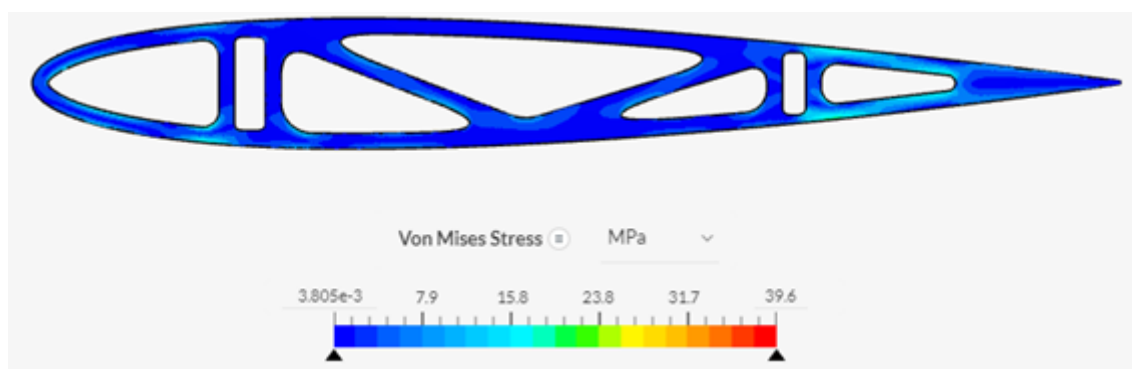


Figura 17 – PLA com a geometria completa da nervura

Com a tensão máxima encontrada durante a simulação inferior a 23MPa, observamos que com a nervura completa as tensões máximas foram inferiores, tornando ainda mais viável a utilização desse material.

5.1.3.2 Compensado Naval Completo:

Assim como no PLA, a tendência das tensões diminuírem com o compensado naval, utilizando a nervura completa, foi observada, e com tranquilidade permitiu que o compensado naval fosse uma opção viável para a fabricação de nervuras. Na imagem a seguir, observa-se o resultado da simulação com o compensado naval:



Figura 18 – Resultado com Compensado naval

Nota-se que a região onde possui maior estresse estrutural é o bordo de fuga, onde seu momento de inércia de área atuante na carga é menor, mas claramente é um estresse maior, porém aceitável.

5.1.3.3 PETG+FC:

Ao observar essa tendência de redução de tensão máxima observada nas simulações, novamente o PETG+FC cumpre os requisitos, tendo espaço para otimizações estruturais na geometria da nervura, a fim de melhor aproveitar a resistência do material. Os resultados da simulação são exibidos na figura 20, e mostrando como o material está sendo subaproveitado com uma geometria robusta assim.

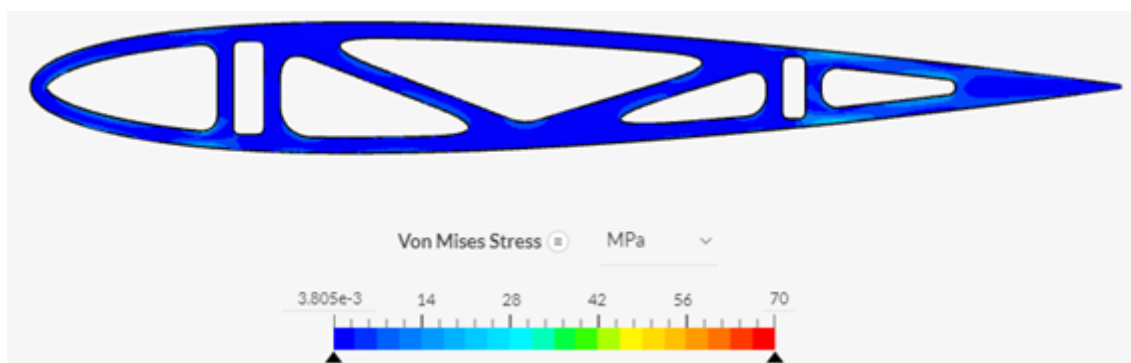


Figura 19 – Simulação de PETG+FC

Como anteriormente foi ressaltado, a região com maior solicitação é o bordo de fuga, mas sendo inferior da tensão de ruptura do PETG+FC, que é aproximadamente 56 MPa, enquanto a tensão máxima observada é de apenas 19.45 MPa.

5.2 ECONOMIA:

Com os resultados das simulações em mãos, foi possível gerar as matrizes de decisão.

Para tomar como base para a criação dos pesos utilizados no processo de escolha dos materiais, a seguinte tabela foi utilizada, sendo considerados os seguintes valores majoritariamente de maneira qualitativa. A forma que foi feita essa análise qualitativa, graduou com a melhor nota de 0 a 10 as qualidades mais desejáveis, ou seja, o menor peso recebeu a maior nota, a maior resistência, recebeu a maior nota, e assim sucessivamente. Os custos de matéria prima, custos de homem hora foram considerados os valores de mercado durante o período de confecção deste trabalho.

Tabela 11 – Tabela base para a criação das matrizes de comparação

Materiais	Peso	Resistência	Custo MP	Custo HH	Custo de Fabricação	Acesso ao Ferramental
PLA	4	4	4	6	8	10
Compensado Naval	8	3	9	6	6	4
Alumínio	2	10	5	9	10	1
PETG+FC	6	8	3	6	8	10

Como o índice de mérito cobre os critérios de peso e resistência, eles não serão abordados nos próximos passos.

Desse modo é possível criar as seguintes tabelas de comparação para os critérios que serão abordados:

5.2.1 Matrizes de Comparação para os índices de mérito que desconsideram o preço por quilo do material (C_m)

5.2.1.1 Índice de mérito para viga rígida e viga forte

Tabela 12 – Tabela de índice de mérito

Materiais	Índice de mérito $E^{1/2}/\rho$	Índice de mérito $\sigma^{2/3}/\rho$
Compensado Naval	88,38	7,82
PLA	38,68	5,67
PETG+FC	55,47	5,76
Alumínio	97,99	5,97

Tabela 13 – Matriz de comparação de Índice de mérito para viga rígida

Índice de Mérito para Viga Rígida	Compensado Naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média Normalizada
Compensado Naval	1,00	2,29	1,59	0,90	0,32
PLA	0,44	1,00	0,70	0,39	0,14
PETG +FC	0,63	1,43	1,00	0,57	0,20
Alumínio	1,11	2,53	1,77	1,00	0,35
Soma total	3,17	7,25	5,06	2,86	

É possível notar que o alumínio possui o maior índice de mérito, seguido do compensado naval para uma viga cujo principal requisito é a rigidez.

Tabela 14 – Matriz de comparação de índice de mérito para viga forte

Índice de Mérito para Viga Forte	Compensado Naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado Naval	1,00	1,38	1,36	1,31	0,31
PLA	0,73	1,00	0,99	0,95	0,22
PETG+FC	0,74	1,01	1,00	0,96	0,23
Alumínio	0,76	1,05	1,04	1,00	0,24
Soma total	3,23	4,44	4,38	4,22	

Já nessa tabela, observamos que o compensado naval passa a ser mais interessante, seguido do alumínio e os materiais de impressão 3d

5.2.1.2 Custo de Materia Prima

A matriz comparação para o custo de matéria prima possui os valores apresentados na seguinte tabela:

Tabela 15 – Matriz comparação para o custo de materia prima

Custo Matéria Prima	Compensado naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado Naval	1,00	2,25	3,00	1,80	0,43
PLA	0,44	1,00	1,33	0,80	0,19
PETG+FC	0,33	0,75	1,00	0,60	0,14
Aumínio	0,56	1,25	1,67	1,00	0,24
Soma total	2,33	5,25	7,00	4,20	

Em questão de custo de matéria prima, o compensado naval é também o mais interessante, pois seu custo por quilo é baixo.

5.2.1.3 Custo Homem Hora

Tabela 16 – Matriz comparação para custo homem hora

Custo Homem Hora	Compensado Naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado Naval	1,00	1,00	1,00	1,50	0,27
PLA	1,00	1,00	1,00	1,50	0,27
PETG+FC	1,00	1,00	1,00	1,50	0,27
Alumínio	0,67	0,67	0,67	1,00	0,18
Soma total	3,67	3,67	3,67	5,50	

Quando observa-se a questão do custo HH, percebe-se que o custo pra a impressão 3d e o corte a laser do compensado naval é praticamente o mesmo, visto que a qualificação necessaria, é muito parecida.

5.2.1.4 Custo de Fabricação

Tabela 17 – Matriz comparação de custo de fabricação

Custo de fabricação	Compensado Naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado Naval	1,00	0,75	0,75	0,60	0,19
PLA	1,33	1,00	1,00	0,80	0,25
PETG+FC	1,33	1,00	1,00	0,8	0,25
Alumínio	1,67	1,25	1,25	1,00	0,31
Soma total	5,33	4,00	4,00	3,20	

O custo de fabricação engloba todo o custo relativo ao maquinario necessario para que a peça seja fabricada, assim como a perda de materia prima durante o processo. Sendo assim, observa-se que pela rapidez e a grande quantidade, o custo de fabricação de uma nervura de alumínio acaba sendo menor, em seguida, por ser um processo praticamente sem desperdícios (pelo fato de não usar material

de suporte para uma nervura) e ter um baixo consumo energético (equivalente ao consumo de uma cafeteira elétrica) a impressão 3D tem um custo baixo, bem próximo ao seu equivalente em alumínio, seguido do corte a laser das nervuras de compensado.

5.2.1.5 Ferramental

Tabela 18 – Matriz comparação de acessibilidade ao ferramental.

Ferramental	Compensado Naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado Naval	1,00	0,40	0,40	4,00	0,16
PLA	2,50	1,00	1,00	9,00	0,40
PETG+FC	2,50	1,00	1,00	9,00	0,40
Alumínio	0,25	0,11	0,11	1,00	0,04
Soma total	6,25	2,51	2,51	23,00	

O acesso ao ferramental, dita a capacidade de fabricar uma nervura em caráter emergencial, onde quer que esteja, assim claramente a nervura fabricada a partir de manufatura aditiva leva vantagem, pois devido ao tamanho pequeno da impressora, e o fato da nervura de um VANT não ser de dimensões elevadas, faz-se possível o transporte de uma impressora 3D para o campo e a sua utilização para a fabricação da nervura. Esse também é o motivo pelo qual o alumínio se sai tão mal nesse quesito.

5.2.2 Matriz de decisão para o caso de índice de mérito que desconsidera o preço do material por quilo (C_m)

Tabela 19 – Matriz de decisão para Viga rígida

Matriz de decisão para viga rígida	Índice de mérito	Custo matéria prima	Custo homem hora	Custo fabricação	Ferramental
Compensado naval	0,32	0,43	0,27	0,19	0,16
PLA	0,14	0,19	0,27	0,25	0,40
PETG+FC	0,20	0,14	0,27	0,25	0,40
Alumínio	0,35	0,24	0,18	0,31	0,04

Tabela 20 – Matriz de decisão para Viga forte

Matriz de decisão viga forte	Índice de mérito	Custo matéria prima	Custo homem hora	Custo fabricação	Ferramental
Compensado naval	0,31	0,43	0,27	0,19	0,16
PLA	0,22	0,19	0,27	0,25	0,40
PETG+FC	0,23	0,14	0,27	0,25	0,40
Alumínio	0,24	0,24	0,18	0,31	0,04

Ao multiplicar pelos pesos apresentados na metodologia do trabalho:

Tabela 21 – Pesos para o primeiro caso

Índice de mérito	0,18
Custo matéria prima	0,08
Custo homem hora	0,06
Custo de fabricação	0,25
Ferramental	0,40

5.2.2.1 Resultados das matrizes de decisão

Tabela 22 – Resultado da matriz de decisão para viga rígida

Compensado naval	0,22
PLA	0,28
PETG+FC	0,29
Alumínio	0,19

Aqui é possível perceber que o PETG+FC é o material mais viável, quando a rigidez é o mais importante

Tabela 23 – Resultado da matriz de decisão para viga forte

Compensado naval	0,22
PLA	0,30
PETG+FC	0,29
Alumínio	0,17

Na tabela acima é possível observar que o PLA e o PETG+FC acabaram por ser as opções mais viáveis, já que a importância dada ao ferramental foi dominante em toda a análise, com enfoque no PLA cru, que devido a ausência do critério de resistência a intempéries, acabou se sobressaindo em relação aos demais materiais.

5.2.3 Matrizes de Comparação para os índices de mérito que consideram o preço por quilo do material (C_m)

5.2.3.1 Índice de mérito para viga rígida e viga forte

	Índice de mérito $E^{1/2}/\rho C_m$	Índice de mérito $\sigma^{2/3}/\rho C_m$
Compensado naval	11,78	1,04
PLA	0,43	0,06
PETG+FC	0,18	0,02
Alumínio	0,82	0,05

No segundo caso é possível observar que o maior índice de mérito corresponde ao compensado naval, devido ao seu baixíssimo custo comparado aos demais materiais.

Tabela 24 – Matriz de comparação para viga rígida

Índice de mérito para viga rígida	Compensado naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado naval	1,00	9,00	9,00	9,00	0,71
PLA	0,11	1,00	2,32	0,53	0,09
PETG+FC	0,11	0,43	1,00	0,23	0,05
Alumínio	0,11	1,90	4,42	1,00	0,15
Soma total	1,33	12,33	16,74	10,75	

Na tabela acima é claro que o compensado naval possui uma grande vantagem em relação aos demais materiais, por conta principalmente do baixo custo da materia prima.

Tabela 25 – Matriz de comparação para viga forte

Índice de mérito viga forte	Compensado naval	PLA	PETG+FC	Alumínio	Média normalizada
Compensado naval	1,00	9,00	9,00	9,00	0,73
PLA	0,11	1,00	3,29	1,27	0,12
PETG+FC	0,11	0,30	1,00	0,39	0,05
Alumínio	0,11	0,79	2,59	1,00	0,10
Soma total	1,33	11,09	15,88	11,65	

Utilizando o índice de merito de viga forte fica ainda mais clara a vantagem do compensado naval, seguido agora do PLA.

As proximas matrizes referentes aos outros critérios serão exatamente as mesmas utilizadas na analise anterior , então:

5.2.4 Matriz comparação para o caso de índice de mérito que considera o preço do material por quilo (C_m)

Tabela 26 – Matriz de decisão para viga rígida

Matriz de decisão para viga rígida	Índice de mérito	Custo homem hora	Custo de fabricação	ferramental
Compensado naval	0,71	0,27	0,18	0,16
PLA	0,09	0,27	0,24	0,40
PETG+FC	0,05	0,27	0,27	0,40
Alumínio	0,15	0,18	0,30	0,04

Tabela 27 – Matriz de decisão para viga forte

Matriz de decisão para viga forte	Índice de mérito	Custo homem hora	Custo de fabricação	Ferramental
Compensado naval	0,73	0,27	0,18	0,16
PLA	0,12	0,27	0,24	0,40
PETG+FC	0,05	0,27	0,27	0,40
Alumínio	0,10	0,18	0,30	0,04

Ao multiplicar pelos pesos apresentados na metodologia do trabalho:

Tabela 28 – Pesos para o segundo caso

Índice de merito	0,44
Custo homem hora	0,06
Custo de fabricação	0,17
Ferramental	0,32

5.2.4.1 Resultados das matrizes de decisão

Tabela 29 – Resultado da matriz de decisão para viga rígida

Compensado naval	0,41
PLA	0,23
PETG+FC	0,21
Alumínio	0,14

Na tabela acima observa-se que o compensado naval é o melhor material para ser utilizado na manufatura de nervuras para asas de VANT quando o índice de mérito é calculado considerando o C_m , já que o compensado é muito mais barato.

Tabela 30 – Resultado da matriz de decisão para viga forte

Compensado naval	0,42
PLA	0,24
PETG+FC	0,22
Alumínio	0,12

O mesmo é observado na viga forte, pois mesmo não sendo o material com as melhores características mecânicas, é extremamente barato.

6 CONCLUSÃO

O presente projeto buscou , por meio de simulações estruturais utilizando o método dos elementos finitos, investigar as capacidades estruturais de nervuras de asas de veículos aéreos não tripulados fabricadas a partir de manufatura aditiva, e posteriormente investigar também a viabilidade econômica desses materiais de impressão 3D. Dessa forma foram estudadas em três geometrias diferentes , quatro materiais , sendo os mais convencionais, o compensado naval e o alumínio, e os menos convencionais e fabricados a partir de manufatura aditiva, o ácido polilático e o polietileno tereftalato glicol + fibra de carbono (PLA e PETG+FC respectivamente). Durante o projeto, notou-se que dos quatro materiais escolhidos para comparação, o PETG+FC só não resiste mais tensões que o alumínio, tendo grande potencial para ser usado na indústria aeronáutica, principalmente em drones, visto que as leis são bem mais flexíveis quanto aos materiais que são empregados. Economicamente, ao compararmos o PETG+FC com os materiais mais convencionais, em situações mais ordinárias, como fabricação de asas chapeadas, empresas produzindo em larga escala, entre outros exemplos, o PETG+FC não mostrou ser o material mais indicado, porém em situações mais difíceis, como emergência de campo, ou uma aeronave naturalmente mais exposta a riscos, a capacidade de imprimir sua peça de reposição aumenta muito a viabilidade do PETG+FC. Com resultados satisfatórios tanto no âmbito estrutural, dadas as devidas ressalvas ao tipo de simulação, como no âmbito econômico, o trabalho foi capaz de esclarecer se o PETG+FC pode ser aplicado, e onde pode ser aplicado com as devidas justificativas. De modo geral, o compensado naval se mostrou melhor em situações cotidianas quando o preço da matéria prima é um fator importante a ser considerado.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

São sugestões de melhoria para trabalhos futuros:

- O modelamento com o acoplamento termodinâmico a partir do GCode;
- Análise dinâmica por elementos finitos com inclusão de outros tipos de materiais(e.g., ligas com memória de forma);
- Adição de mais critérios a serem pesados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. P. de. **Aplicação do método AHP- Processo Analítico Hierarquico - A Seleção de Helicópteros para Apoio Logístico à Exploração e Produção de Petróleo "Offshore"**. São Paulo, SP, Brasil: [s.n.], 2002.
- ASHBY, M. F. **Materials Selection in Mechanical Design**. Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803: Pergamon Press, 2005.
- DHARMENDRA et al. Design and analysis of an aircraft wing rib for different configurations. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 07, n. 180, p. 180, 2020.
- EMPORIO DOS METAIS. **ALUMÍNIO 6061**. [S.l.], 2019.
- FISH, J.; BELYTSCHKO, T. **A First Course in Finite Elements**. Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: JohnWiley Sons, Ltd, 2007.
- GARBER, M. F. **Aplicação da Teoria da Utilidade nas Decisões da construção naval**. Brasil: [s.n.], 2002.
- Hangar 33. **A ERA DOS COMPÓSITOS NA FABRICAÇÃO DAS AERONAVES**. 2015.
Disponível em: <<http://blog.hangar33.com.br/a-era-dos-compositos-na-fabricacao-das-aeronaves/>>.
- PRINTERLY, D. **Is PLA UV Resistant? Including ABS, PETG More**. Url <https://3dprinterly.com/is-pla-uv-resistant-including-abs-petg-more/>.
- SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. United States of America: McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1980.
- SATHAYE, S. S. **Lift Distributions on Low Aspect Ratio Wings at Low Reynolds Numbers**. Estados Unidos: [s.n.], 2004.
- SOUZA, M. V. B. C. D. **CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE ELEMENTOS DE COMPENSADO NAVAL**. João pessoa, PB - Brasil: [s.n.], 2019.
- TRAK. **Carbon Fiber PETG**. [S.l.], 2021.
- ULTIMAKER. **Ultimaker PLA Technical data sheet**. [S.l.], 2022.
- UNESP. **AVALIAÇÃO DAS SOLUÇÕES**. Guaratinguetá, SP, Brasil: [s.n.], –.