

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA AERONÁUTICA

JOÃO PEDRO NIERO

PROPOSTA DE MÉTODO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA
COMPONENTES ESTRUTURAIS DE VANTS

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

JOÃO PEDRO NIERO

PROPOSTA DE MÉTODO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA
COMPONENTES ESTRUTURAIS DE VANTS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita
Filho” como requisito para obtenção de título de
Bacharel em Engenharia Aeronáutica

Orientador: Prof. Dr. Éder Luiz Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. Crystopher Cardoso de Brito

SÃO JOÃO DA BOA VISTA

2024

N676p Niero, João Pedro
Proposta de método para seleção de materiais para componentes estruturais de vants / João Pedro Niero. -- São João da Boa Vista, 2024
48 p. : il., tabs., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientador: Éder Luiz Oliveira
Coorientador: Crystopher Cardoso de Brito

1. Drone. 2. Ciência dos materiais. 3. Aeronáutica. 4. Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), 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

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA
COMPONENTES ESTRUTURAIS DE VANTS**

Aluno: João Pedro Niero
Orientador: Prof. Dr. Éder Luiz Oliveira

Banca Examinadora:

- Éder Luiz Oliveira (Orientador)
- Leandra Isabel de Abreu (Examinadora)
- Lucas Daniel Del Rosso Calache (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Expediente nº 107/2022)

São João da Boa Vista, 05 de julho de 2024

RESUMO

Se a seleção de materiais é uma etapa de fundamental importância em qualquer projeto mecânico, em projetos do setor aeronáutico e aeroespacial ela é de fato primordial. Com a utilização crescente de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) para as mais diversas aplicações, ter ferramentas que auxiliem no processo de seleção de material é muito útil especialmente na fase de projeto preliminar. O presente trabalho propõe um método baseado no uso combinado do método de Ashby com o método de Pahl & Beitz para classificação de materiais para componentes estruturais internos de um VANT tipo flying wing. Para além do Índice de Mérito obtido através por meio do método de Ashby, o método proposto também leva em consideração a influência do custo, da dificuldade de fabricação e da resistência à corrosão, ou seja, torna mais completo visto que passa a considerar outras variáveis que também são relevantes para a escolha do material. Estes fatores são considerados para a escolha do material, e cada um deles têm um índice de mérito que é definido pelo usuário de acordo com a priorização das diferentes variáveis de projeto. Este método combinado foi implementado utilizando o Microsoft® Excel, e diferentes cenários foram simulados com o intuito de verificar a influência da priorização das variáveis de projetos consideradas. Como resultado, observou-se que para a maioria dos casos considerados as ligas de alumínio apareceram como a escolha mais viável, uma vez que as mesmas são leves, apresentam bons níveis de rigidez, resistência à corrosão e boas características de processamento e conformação na forma desejada quando comparadas as demais classes de materiais que analisadas no presente trabalho. Todavia, os materiais compósitos também se apresentam como bons candidatos quando o Índice de Mérito tem maior peso na escolha, uma vez que apresentam a melhor relação entre o módulo de elasticidade e a densidade.

Palavras-chave: seleção de materiais; método de ashby; classificação.

ABSTRACT

If material selection is a fundamentally important step in any mechanical project, in projects in the aeronautical and aerospace sector it is in fact essential. With the increasing use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the most diverse applications, having tools that assist in the material selection process is very useful, especially in the preliminary design phase. The present work proposes a method based on the combined use of the Ashby's methodology and Pahl & Beitz method for classifying materials for internal structural components of a flying wing UAV. In addition to the Performance Index obtained through the Ashby method, the proposed method also takes into account the influence of cost, manufacturing difficulty and corrosion resistance, it becomes more complete as it starts to consider other variables which are also relevant in a material selection. These factors are considered when choosing the material, and each of them has a performance index that is defined by the user according to the prioritization of different project variables. This combined method was implemented using Microsoft® Excel, and different scenarios were simulated in order to verify the influence of the prioritization of the project variables considered. As a result, it was observed that for the majority of cases considered, aluminum alloys appeared as the most viable choice, since they are light, have good levels of stiffness, corrosion resistance and good processing characteristics when compared to the other classes of materials analyzed in this work. However, composite materials also present themselves as good candidates when the Performance Index has greater weight in the choice, since they present the best relationship between Young's modulus and density.

Keywords: material selection; ashby's methodology; classification.

LISTA DE ABREVIATURAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
VANT	Veículo Aéreo não Tripulado
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unmanned Aircraft Systems
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ICAO	Organização Internacional da Aviação Civil
IRVA	Inteligência, Reconhecimento, Vigilância e Aquisição de Alvos
IM	Índice de Mérito

SUMÁRIO

1. Introdução	7
1.1 <i>Motivação.....</i>	7
1.2 <i>Objetivos</i>	9
1.3 <i>Estruturação do trabalho</i>	9
2. Revisão bibliográfica	11
2.1 <i>Veículos aéreos não tripulados</i>	11
2.2 <i>Seleção de Materiais</i>	14
2.2.1 <i>Metodologias de seleção de materiais</i>	16
2.2.1.1 <i>Método de Ashby</i>	16
2.2.1.2 <i>Método de Pahl & Beitz</i>	21
2.2.1.3 <i>Escolha de materiais a partir de softwares</i>	23
3. Metodologia.....	25
4. Análise dos Resultados.....	35
4.1 <i>Densidade.....</i>	35
4.2 <i>Módulo de Elasticidade</i>	36
4.3 <i>Analizando somente pelo índice de mérito</i>	37
4.4 <i>Analizando as pontuações ao dar maior importância ao índice de mérito.....</i>	38
4.5 <i>Priorizando Custo</i>	40
4.6 <i>Priorizando a resistência à corrosão.....</i>	42
5. Conclusões	45
6. Referências	47

1. Introdução

1.1 Motivação

VANTs

De acordo com a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil), a definição de VANT (Veículo Aéreo não Tripulado) consiste em uma aeronave projetada para operar sem piloto a bordo, e que não seja utilizada para fins meramente recreativos. A sigla VANT vem da tradução do termo em inglês UAV (Unmanned Aerial Vehicle) (ANAC, 2023), entretanto ainda existem outras nomenclaturas como drones, UAS (Unmanned Aircraft Systems) ou ainda RPAS (Remotely Piloted Aircraft System). De acordo com o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo), o termo drone é utilizado de forma coloquial e popular para referir-se aos equipamentos aéreos remotamente pilotados. A palavra drone, significa “zangão” na tradução do inglês e isso se deve ao ruído que tal equipamento costuma produzir em voo (DECEA, 2019). A sigla UAS é adotada por algumas organizações britânicas e norte-americanas e tem como significado Unmanned Air/Aircraft System (FAN, 2021). RPAS é o termo técnico utilizado pela ICAO para se referir aos sistemas de aeronaves remotamente pilotadas sem finalidades recreativas (DECEA, 2019). VANTs vem se tornando uma proposta ideal para desenvolvimento de novas tecnologias devido a sua capacidade de assumir missões de alto risco e seu potencial para operações de baixo custo (JORGE; INAMASU, 2014). Atualmente, seu uso vem crescendo em diversas indústrias, na agricultura, por exemplo, o mesmo pode ser utilizado para monitorar e desenvolver lavouras a fim de aumentar a produtividade. As utilizações mais comuns nesse ramo são na detecção de falhas de plantio, contagem de plantas, identificação de pragas e pulverização (JORGE; INAMASU, 2014).

Outro segmento que pode fazer uso de VANTs é o da construção civil, onde VANTs podem ser utilizados na captura de imagens para diversas finalidades como mapeamento da área construída, segurança, monitoramento do progresso da obra e dos funcionários, além de possibilitar a auditoria em obras públicas e privadas. Fora isso, ainda há a possibilidade de utilização de VANTs para a captação de imagens para

eventos, entregas e transmissão de imagens para atividades jornalísticas (JORGE; INAMASU, 2014).

Para fins militares, as RPAS podem contribuir com a substituição de tarefas antes realizadas por seres humanos, sendo pilotadas de locais fora da área de conflito. Entre as possíveis utilizações nesse contexto estão ações de IRVA (Inteligência, Reconhecimento, Vigilância e Aquisição de Alvos); realização de ataques a tropas no terreno, e até drones suicidas (FAN, 2021).

As missões IRVA podem ser feitas em dois níveis: operacional e tático. A nível operacional, tem como objetivo coletar dados dos movimentos das unidades inimigas; enquanto a inteligência tática busca conhecimento sobre composição das forças inimigas, terreno, meteorologia e construções civis. Em ambos os níveis, os drones têm ampla aplicação, a captura de imagens feitas pelo mesmo é mais precisa do que o relatório de uma tropa e não há a necessidade de preocupação de ser uma missão suicida. Diante do apresentado, os drones são de grande valia no principal objetivo das IRVAs: detectar ameaças o mais cedo e o mais longe possível (SISTEMA DE ARMAS, 2023).

Seleção de Materiais

A seleção de materiais, seja na indústria aeronáutica, como em qualquer outra, é de fundamental importância nos mais diversos componentes de forma a otimizar as características desejadas. Diversos fatores devem ser levados em consideração, dentre outros, podem ser citados (FERRANTE, 2013).

- Propriedades mecânicas desejadas;
- Custo;
- Dificuldade de fabricação;
- Resistência à corrosão;
- Tipo de esforço que o componente estará submetido.

Este trabalho é motivado pelo interesse em encontrar uma forma de auxiliar na seleção de materiais para componentes estruturais de VANTs (Veículos Aéreos Não

Tripulados). Esses veículos estão ganhando popularidade em diversos setores. A abordagem combina o Método de Ashby, amplamente utilizado na seleção de materiais em projetos mecânicos, com a metodologia de Pahl & Beitz. A escolha da combinação entra as metodologias parte do desejo em aliar o índice de mérito obtido através do método de Ashby e que representa o quão bem um material cumpre os requisitos de projeto desejados com a capacidade do método de Pahl & Beitz de levar considerar um número maior de requisitos e classificar através do peso atribuído a cada um deles dentro do projeto em questão

1.2 Objetivos

Levando isso em consideração, o trabalho visa a implementação de um método combinado entre a metodologia de Ashby e o método de Pahl & Beitz para auxiliar a seleção de materiais para componentes estruturais de VANTs de forma a otimizar as características desejadas, buscando atender aos requisitos de projetos com a melhor relação entre custos e propriedades desejadas em um produto que ainda possui uma ampla gama de possibilidades a serem exploradas no mercado.

1.3 Estruturação do trabalho

O corpo do presente trabalho é dividido entre as seguintes seções:

- Revisão bibliográfica;
- Metodologia;
- Análise dos resultados; e
- Conclusões.

Na seção denominada “Revisão bibliográfica” é apresentada uma revisão da literatura corrente sobre o tema abordado no trabalho, dessa forma, é trazida uma revisão sobre a importância da seleção de materiais em um projeto mecânico e são apresentadas as metodologias de seleção de materiais nas quais o presente trabalho se baseia. Em seguida, é trazido um pouco da história dos VANTs e suas principais aplicações nos dias atuais.

Na seção 3 – Metodologia, são apresentados os métodos e ferramentas utilizados no desenvolvimento do presente trabalho, sendo ambos baseados nas metodologias mostradas na seção anterior de forma a obter-se um modo capaz de levar em consideração os principais para seleção de materiais no escopo do trabalho de forma a gerar diferentes cenários e obter diferentes resultados para cada um deles a depender da variável de projeto a ser priorizada e do nível de prioridade de cada um deles.

A seguir, tem-se a seção de análise dos resultados, onde, após a aplicação da metodologia mostrada na seção anterior, são discutidos os resultados obtidos em cada um dos cenários em questão.

Por fim, são apresentadas as conclusões obtidas pelo autor a partir da análise dos resultados e mostradas possíveis sugestões de trabalhos futuros com base neste.

2. Revisão bibliográfica

2.1 Veículos aéreos não tripulados

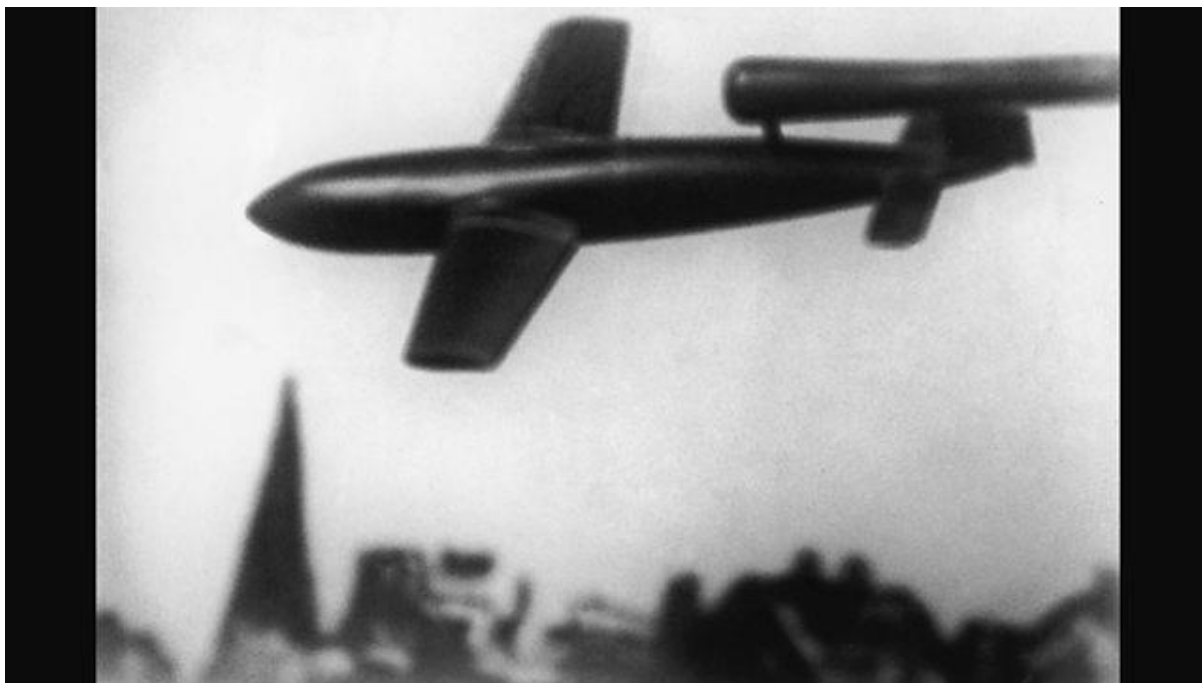
Durante a primeira guerra mundial, técnicos ingleses e norte-americanos projetaram e desenvolveram aeronaves experimentais para explorar a praticidade de enviar aeronaves não tripuladas carregadas com explosivos para bombardear a Alemanha (JANSSON, 2012). Daí em diante, estrategistas de guerra em diversos países começaram a notar os potenciais de tal arma, desde que a mesma fosse simples o suficiente para se fabricar a ponto de exigir poucas horas de trabalho. O uso de aeronaves convencionais não tripuladas carregadas de explosivos foi vista como inviável, uma vez que o custo em horas de trabalho e materiais seria demasiadamente alto em relação aos danos que a quantidade de explosivos transportada poderia causar (JANSSON, 2012).

Os primeiros usos bem-sucedidos dos VANTs remontam à época da segunda guerra mundial, com seu uso sendo destinado a -missões de reconhecimento de território, fotografias de bases inimigas e bombardeios, sendo este último o foco do seu desenvolvimento naquele momento. Os mesmos eram carregados com explosivos e lançados para o território inimigo como um míssil remotamente controlado (Rodrigues, 2020).

Partindo dessa ideia, a força aérea alemã conseguiu desenvolver a bomba V1, controlada remotamente. Porém, havia o problema de que não era possível ter precisão na determinação de onde a mesma iria atingir, uma vez que esta começava a cair depois que seu motor se desligava por falta de combustível. Por isso, a V1 era direcionada e lançada rumo a um alvo, mas o local que a mesma atingiria dependia de quando acabaria seu combustível (JANSSON, 2012).

Os problemas iniciais do V1 foram sanados e com isso foi produzido na sequência o V2 que teve sua tecnologia empregada por Estados Unidos e União Soviética na corrida espacial (Rodrigues, 2020).

Figura 1 – Bomba V1



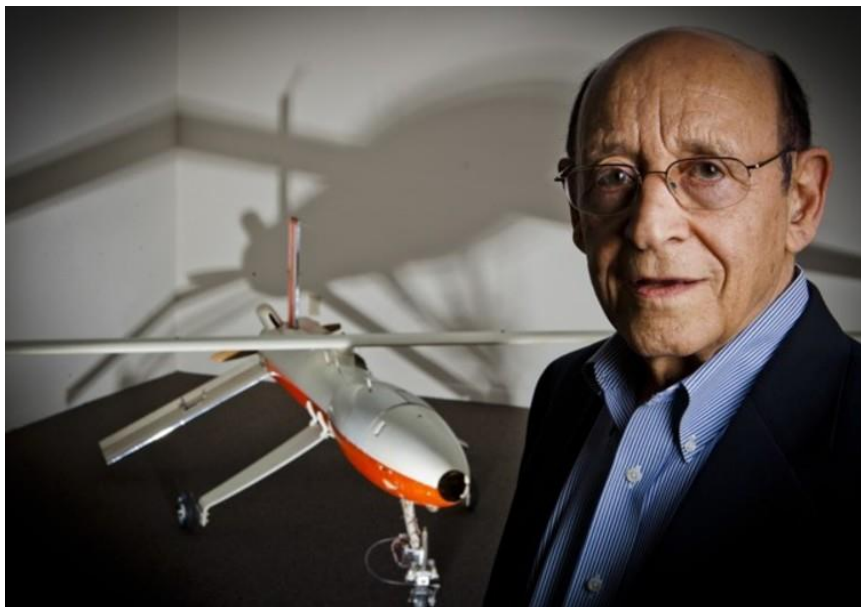
Fonte: Retirado de BBC (BBC, 2020)

Porém, mesmo sendo utilizada como auxílio na guerra espacial, a tecnologia dos VANTS na época era ainda considerada rudimentar e necessitava de melhorias para ser desenvolvida e foi apenas nos anos 1970 que, notando a defasagem de tecnologias para serem empregadas aos VANTS, Abraham Karem mudou completamente o cenário a partir do desenvolvimento de novos meios de operação e de fabricação (Rodrigues, 2020).

Abraham Karem começou a construir modelos de aeronaves aos 14 anos. O mesmo formou-se em Engenharia Aeronáutica no Technion - Instituto de Tecnologia de Israel. Seu primeiro VANT foi construído para a Força Aérea Israelense durante a Guerra do Yom Kipur (BUZZO, 2015).

Quando Karem chegou aos Estados Unidos da América em 1977, o VANT existente na época necessitava de 30 pessoas para ser operado e possuía autonomia para 20 horas de voo. Diante de tal situação, ele fundou na garagem de sua residência a Leading System e fazendo uso de materiais como restos de madeira, fibra de vidro caseira e motores utilizados em karts, Karem criou o *Albatross*: um VANT com capacidade de permanecer no ar por 56 horas sem a necessidade de recarga de baterias e que necessitava de 3 pessoas para ser operado (BUZZO, 2015).

Figura 2 - Abraham Karem, considerado o “pai” dos VANTs



Fonte: Retirado de Buzzo (BUZZO, 2015).

Tal feito levou Karem a receber um financiamento da DARPA para aprimorar o protótipo e, com isso, surgiu o *Amber*. Karem dizia: “Eu só queria que os veículos aéreos não tripulados operassem com os mesmos padrões de segurança, confiabilidade e desempenho que aviões tripulados”. Abraham Karem é considerado o “pai” dos VANTs como conhecemos atualmente (BUZZO, 2015).

DARPA é a sigla, em inglês, para Defense Advanced Research Projects Agency que é a agência do Departamento de Defesa norte-americano que realiza os investimentos iniciais essenciais ao desenvolvimento de tecnologias na área de defesa (DARPA, 2023).

Nos dias atuais, os VANTS são utilizados principalmente em inteligência militar e segurança pública, porém, apresentam potenciais de aplicação também na área civil, o mesmo destaca o uso nas áreas de: missões para ciências da terra, gestão costeira e do uso do solo (SOUSA, 2017).

Outro ramo que vem aumentando o uso de VANTs é o mercado geoinformacional. De acordo com o INPE (INPE, 2023), os VANT são utilizados como plataforma para o sensoriamento remoto em aplicações como:

- Cadastro de propriedades;
- Segurança;
- Monitoramento de Obras;
- Agricultura de precisão;
- Mineração;
- Monitoramento ambiental.

Figura 3 - Alguns modelos de VANTs conhecidos comercialmente



Fonte: AERO (AERO, 2023)

Quanto aos modelos, os mais comumente encontrados são os multirotores e os de asa fixa. Os multirotores tem como principal vantagem a sua capacidade de planar e levantar voo verticalmente, o que permite a decolagem em locais mais apertados (SOUSA, 2017). Os de asa fixa, no entanto, possibilitam voos mais longos, sendo mais adequados para levantamentos maiores envolvendo cidades inteiras ou aplicações em agricultura de precisão (SOUSA, 2017).

2.2 Seleção de Materiais

A correta seleção de materiais em um projeto mecânico é uma tarefa desafiadora, uma vez que existem uma grande variedade de critérios que podem ser levados em consideração. Um material raramente possui a combinação máxima ou ideal de propriedades, de forma que pode se fazer necessário abrir mão de uma característica para obter outra, tendo como um exemplo a ductilidade e a resistência mecânica (CALLISTER, 2016). Outro aspecto que pode ser levado em consideração é a deterioração das propriedades do material durante sua vida útil. Segundo Callister (CALLISTER, 2016), as condições de serviço devem ser consideradas, uma vez que as mesmas ditam as propriedades do material que serão necessárias. Deve-se, ainda, ser considerado o aspecto econômico uma vez que um material com características próximas às ideais pode apresentar um custo elevado a ponto de inviabilizar sua utilização, incluindo-se também o custo de conformação da peça na forma desejada.

De acordo com Ferrante (FERRANTE, 2013), os procedimentos para seleção de materiais obedecem a uma grande variedade de critérios que, se considerados individualmente, levam a alternativas de escolhas simples, mas ressalta que, na prática é comum lidar com situações em que conjuntos de critérios possivelmente conflitantes devem ser satisfeitos ao mesmo tempo. Diante disso, faz se necessário o uso de procedimentos de interação e otimização, que podem levar ao que o autor denomina de “filosofia do compromisso”, sendo esta entendida como o sacrifício de uma ou mais propriedades em benefício de uma otimização geral (FERRANTE, 2013). Segundo Ferrante, os 16 critérios mais representativos na seleção de materiais são os listados abaixo:

- Considerações dimensionais;
- Considerações de forma;
- Considerações de peso;
- Considerações de resistência mecânica;
- Resistência ao desgaste;
- Conhecimento das variáveis de operação;
- Facilidade de fabricação;
- Requisitos de durabilidade;
- Número de unidades;
- Disponibilidade do material;

- Custo;
- Existência de especificações e códigos;
- Viabilidade de reciclagem;
- Valor de sucata;
- Grau de normalização;
- Tipo de carregamento.

Destes, na metodologia aplicada ao presente trabalho são considerados:

- Considerações de peso;
- Considerações de resistência mecânica;
- Resistência ao desgaste;
- Facilidade de fabricação;
- Custo;
- Considerações de forma;
- Tipo de carregamento.

Todos os fatores listados são de grande importância na seleção de materiais, porém, alguns deles têm maior destaque no contexto do trabalho em questão devido as considerações apresentadas na seção Metodologia. O método de Ashby é apresentado na seção 2.1.1. Sua formulação baseia-se em índices de mérito de um material, e no presente trabalho os mesmos são obtidos considerando-se o tipo de carregamento e as Condições de Contorno (CCs). Para o cálculo utiliza-se do módulo de elasticidade e densidade do material. Por outro lado, a metodologia apresentada na seção 2.1.2, permite levar em consideração outros fatores que podem ser relevantes no projeto, e para o presente trabalho foram escolhidos, além dos já citados anteriormente, o custo, dificuldade de fabricação e resistência à corrosão.

2.2.1 Metodologias de seleção de materiais

2.2.1.1 Método de Ashby

Segundo Ashby (ASHBY, 2012), o universo dos materiais é dividido em famílias, classes, subclasses e membros, sendo que cada membro é caracterizado por um conjunto de atributos, no caso, suas propriedades. A Figura 4 abaixo ilustra a divisão citada, nela pode-se notar, como exemplo, que o universo dos materiais possui a família

dos metais e nela está contida a classe “ligas de alumínio”, a subclasse ‘série 6000’ e nela o membro “Liga 6061”.

Figura 4 - Divisão do universo dos materiais

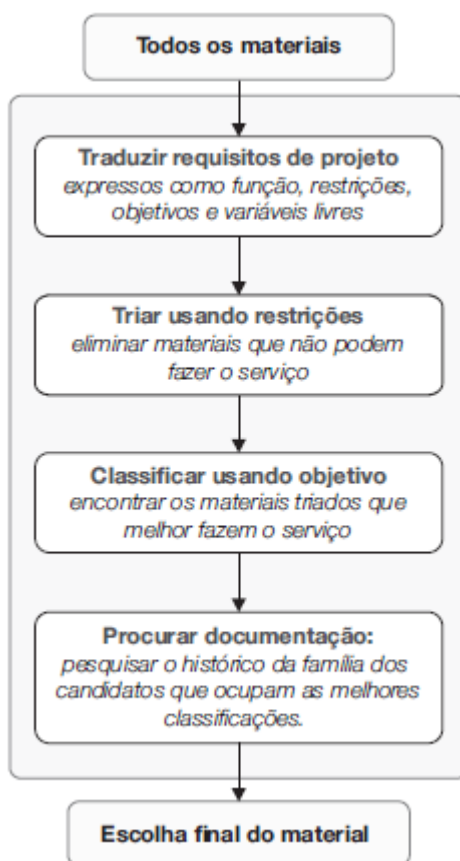


Fonte: Retirado de Ashby (ASHBY, 2012).

A tarefa de seleção de materiais resume-se a identificar o perfil de atributos desejados e, em seguida, compará-lo com o dos materiais de engenharia reais no intuito de encontrar a melhor combinação (ASHBY, 2012).

A primeira etapa da seleção, segundo Ashby, é a tradução, sendo que esta consiste em examinar os requisitos de projeto para encontrar as possíveis restrições que eles impõem à escolha do material, tal processo, segundo o mesmo, reduz a imensa amplitude de escolha por meio da segunda etapa o processo, sendo esta a etapa de triagem que consiste na eliminação dos materiais que não podem cumprir a função. A seguir vem a etapa de classificação, que ordena os materiais restantes de acordo com sua capacidade de cumprir tal função. Por fim, vem a etapa de documentação, que consiste em analisar os candidatos que foram melhor classificados, examinando seu uso até o momento, verificando histórico de falhas e as melhores maneiras de elaborar um projeto com eles. A Figura 5 ilustra as etapas citadas (ASHBY, 2012).

De acordo com Ferrante (FERRANTE, 2013), os mapas de propriedades de Ashby procuram agrupar todas as famílias de materiais em gráficos cujas coordenadas compõem, quando possível, os índices de mérito utilizados em cálculos de dimensionamento e seleção de materiais.

Figura 5 - Etapas da seleção de materiais

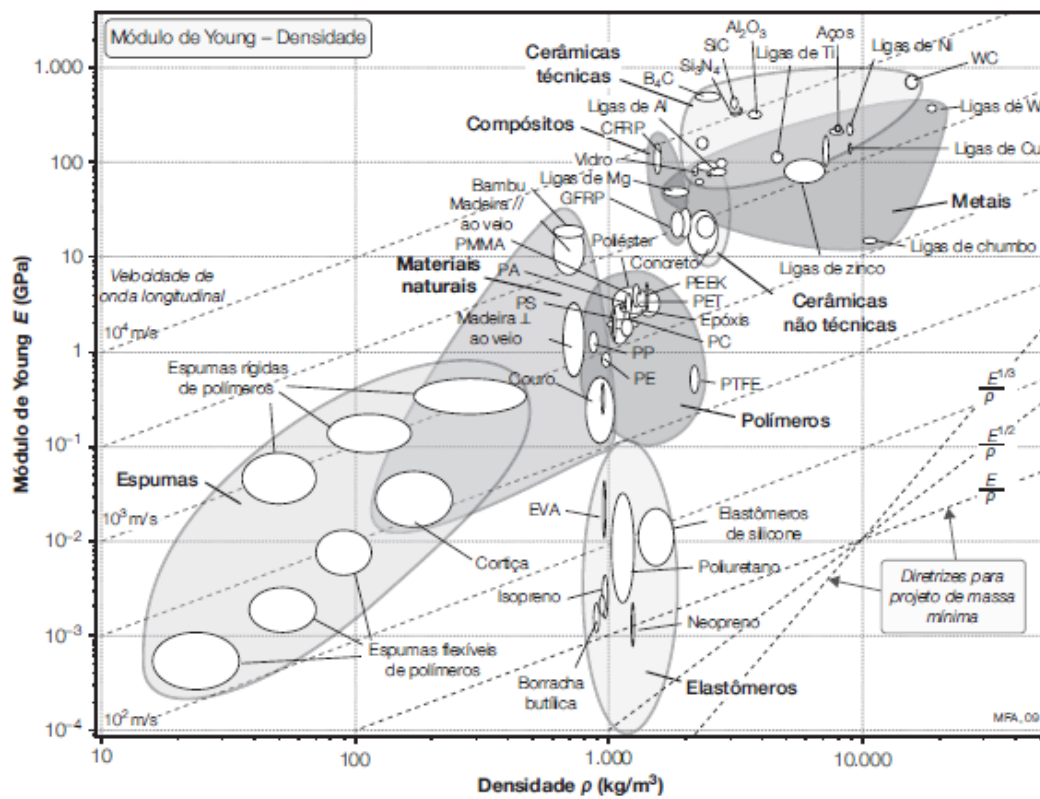
Fonte: Retirado de Ashby (ASHBY, 2012).

Tomando como exemplo o diagrama Resistência - Densidade, ilustrado na Figura 6, pode-se notar que é possível comparar situações em termos do peso de uma determinada estrutura ou componente, característica importante na indústria aeroespacial. A figura, além de mapear um grande número de materiais em termos da relação resistência mecânica / densidade, ainda mostra meios de proceder a escolha de acordo com o critério de mínimo peso (FERRANTE, 2013). O índice de mérito adota valores que dependem da geometria do elemento ao qual a carga é aplicada.

No mapa abaixo, é possível notar as diretrizes de σ_f / ρ , $\sigma_f^{2/3} / \rho$ e $\sigma_f^{1/2} / \rho$ constantes, sendo estas utilizadas em projetos de peso mínimo, limitado pelo escoamento (ASHBY, 2012).

Figura 6 - Diagrama Resistência – Densidade

Figura 7 – Diagrama módulo de Young – Densidade

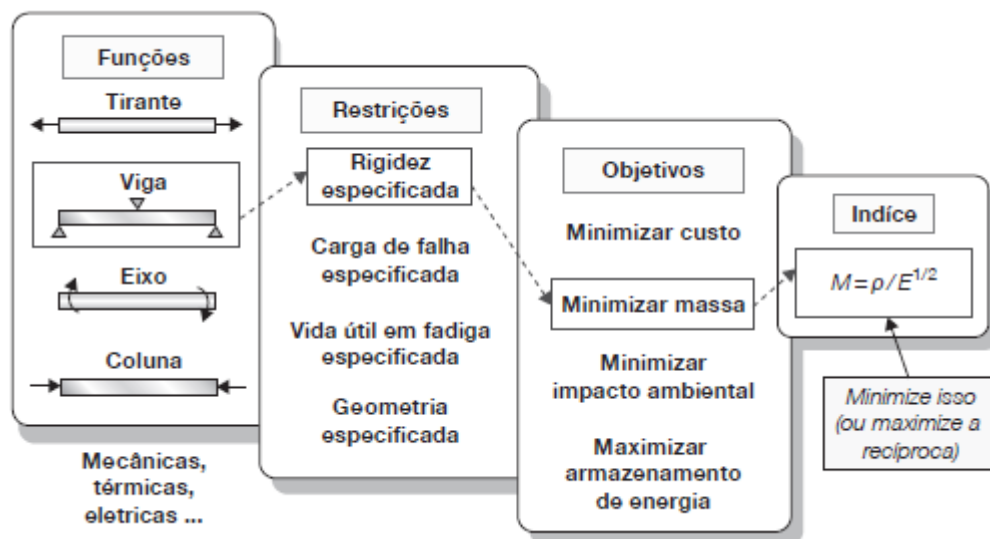


Fonte: Retirado de Ashby (ASHBY, 2012).

Então, pode-se resumir o processo descrito por Ashby nas seguintes etapas:

- Tradução das restrições de projeto;
- Triagem por meio da aplicação dos limites de um determinado atributo;
- Classificação dos candidatos por meio dos índices de material nos diagramas; e
- Documentação para explorar a fundo o material.

Figura 8 - Etapas da definição da função até a obtenção do índice de mérito



Fonte: Retirado de Ashby (ASHBY, 2012).

Tal processo é simples quando se trabalha com um número pequeno de materiais e de restrições, mas, não é o que normalmente acontece (ASHBY, 2012). Diante de tal fato, os problemas tratados neste parágrafo podem ser solucionados por meio da implementação do método para seleção de materiais em computador.

2.2.1.2 Método de Pahl & Beitz

O método de Ashby, abordado no tópico anterior, permite uma classificação dos materiais candidatos apenas levando em consideração o IM, que representa o quão bem um material cumpre sua função de acordo com os objetivos definidos no projeto.

Apesar de o Índice de Mérito ser o principal fator a ser considerado na escolha de um material, outros critérios também podem ser levados em consideração para uma seleção mais adequada. Para isso, pode-se utilizar uma matriz de decisão, como a empregada no método de Pahl & Beitz (também conhecido como metodologia tradicional), onde são definidas outras variáveis relevantes e seus respectivos pesos. Esses pesos dependem da experiência do usuário com cada variável (FERRANTE, 2000). Para cada material candidato é atribuída uma nota em relação a cada variável de acordo com os atributos de cada material na base de dados de materiais que foram consultados. A nota final de cada material é uma média ponderada das notas.

Uma maior quantidade de variáveis possibilita uma escolha mais precisa, assim como uma base de dados mais abrangente. O peso de cada variável é determinado pela experiência da pessoa responsável pela seleção dos materiais, e a nota de cada variável é atribuída por essa mesma pessoa para refletir a importância de cada uma delas no componente em questão (FERRANTE, 2000)

As Tabelas 1 e 2 abaixo apresentam as notas para a matriz de decisão em Escala 5 e em Escala 11, respectivamente.

Escala 5:

Tabela 1 – Notas para matriz de decisão de Pahl & Beitz em Escala 5

Escala	Significado
0	Insatisfatório
1	Tolerável
2	Adequado
3	Bom
4	Ótimo

Fonte: Retirado de Ferrante (Ferrante, 2000)

Escala 11:

Tabela 2 – Notas para matriz de decisão de Pahl & Beitz em Escala 11

Escala	Significado
0	Totalmente inútil
1	Muito inadequado
2	inadequado
3	Tolerável
4	Adequado
5	Satisfatório
6	Bom com problemas
7	Bom
8	Muito bom
9	Excelente
10	Ideal

Fonte: Retirado de Ferrante (Ferrante, 2000)

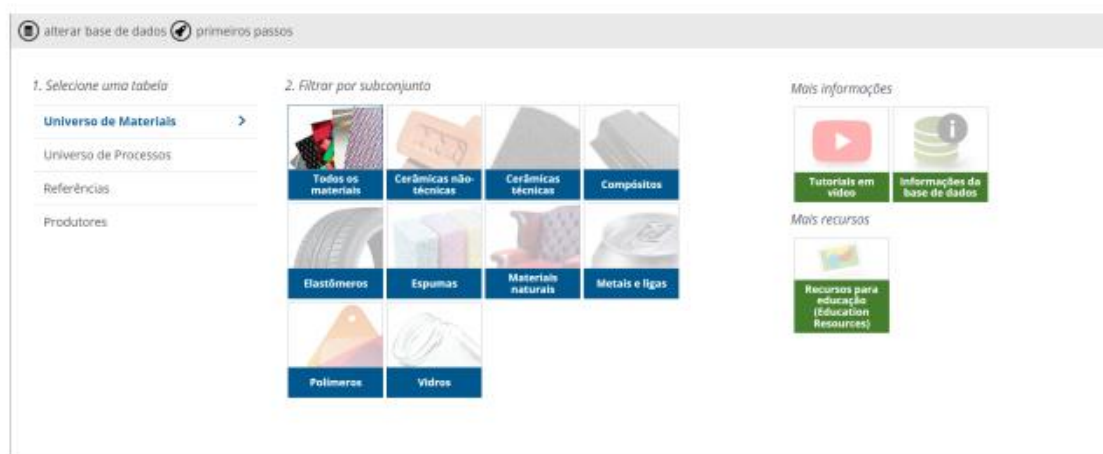
O presente trabalho faz o uso de uma combinação entre a metodologia de Ashby e a metodologia tradicional, de forma a considerar um número maior de variáveis além do Índice de Mérito, no caso, foram também considerados o custo, a resistência à corrosão e a dificuldade de fabricação.

2.2.1.3 Escolha de materiais a partir de softwares

Nos dias atuais, um número exorbitante de materiais de engenharia são existentes e possuem ampla base de dados registrados em softwares que permitem sua escolha por meio de uma série de variáveis solicitadas, de forma a buscar materiais que melhor satisfaçam o conjunto de características desejadas.

Um dos softwares que podem ser citados nesse contexto é o Ansys Granta, anteriormente conhecido como CES Edupack, que permite a seleção de materiais por meio de uma extensa base de dados que abordam propriedades elétricas, propriedades mecânicas, propriedades térmicas e aplicações de um material (ANSYS, 2024).

Figura 9 – Tela de acesso a base de dados do Ansys Granta.

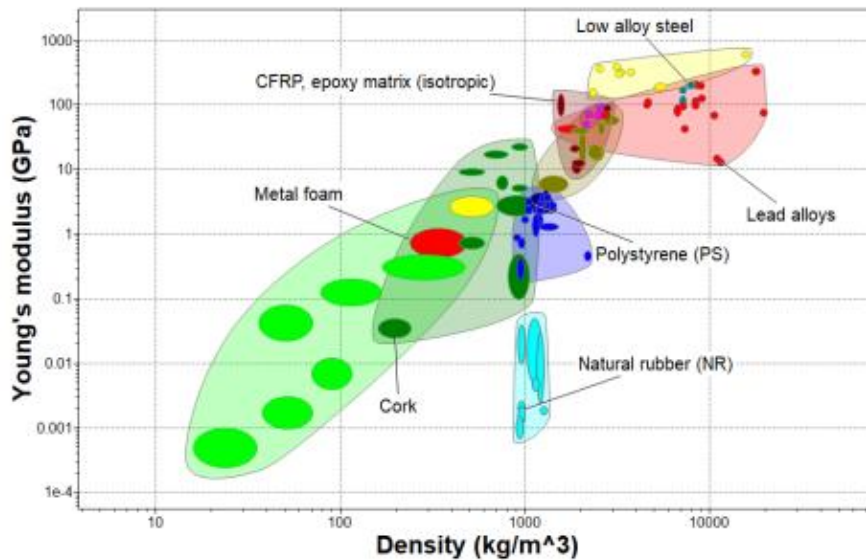


Fonte: Retirado de ANSYS (ANSYS, 2024).

Fazendo o uso da ferramenta “BROWSE” é possível navegar pelos registros de propriedades dos materiais e explorar a base de dados de cada um deles. A ferramenta “SEARCH” permite encontrar os dados de materiais a partir de uma pesquisa rápida por meio de palavras-chave. Já a ferramenta “SELECT” permite a criação de gráficos de

propriedades de materiais e ainda selecionar as classes de materiais que se deseja visualizar no gráfico desejado. A Figura 10 demonstrar um mapa de Ashby do módulo de elasticidade (E) em função da densidade (ρ) gerado por meio do Ansys Granta (ANSYS, 2024).

Figura 10 – Mapa de Ashby de E (GPa) em função de ρ (kg/m^3) gerado por meio do Ansys Granta



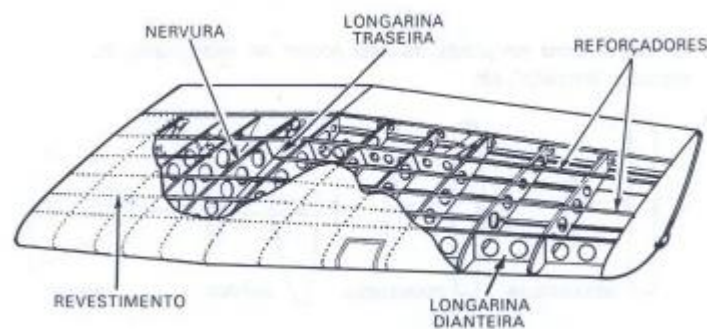
Fonte: Retirado de ANSYS (ANSYS, 2024).

O software permite ainda filtrar a busca por materiais por meio da definição de valores mínimos e/ou máximos desejados de propriedades desejadas e ainda definir outras variáveis desejáveis relativas ao processo de fabricação (ANSYS, 2024).

3. Metodologia

Para elaborar este trabalho, foi utilizado como base um VANT do tipo asa voadora, uma vez que esses veículos possuem asas fixas. Dessa forma, seus principais componentes estruturais são semelhantes aos componentes estruturais da asa convencional, incluindo longarinas e nervuras. Dessa maneira, a escolha desse tipo de VANT leva em consideração que os índices de materiais obtidos e a consequente e o método implementado na metodologia pode ser aplicada a nervuras e longarinas de aeronaves de asa fixa como um todo.

Figura 11 – Componentes de uma asa



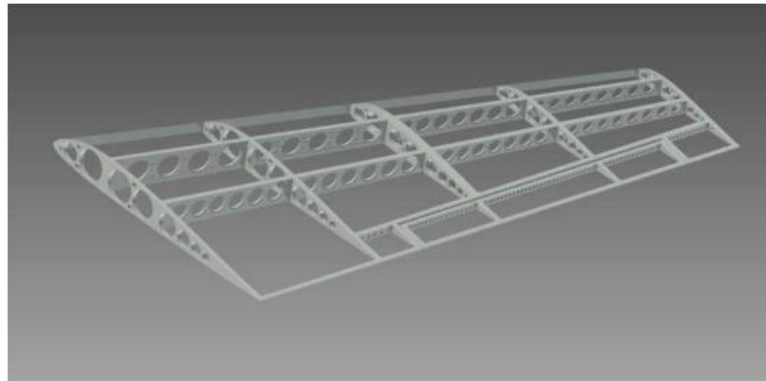
Fonte: (FORMAÇÃO DE PILOTO, 2023)

As nervuras são chapas no formato da seção da asa e, de acordo com (LOPES, 2014), elas dão suporte ao revestimento da asa prevenindo a flambagem, além de evitar que o combustível flua durante as manobras. Porém, a função estrutural primária de uma nervura é suportar os momentos fletores devidos aos esforços aerodinâmicos ao qual a asa está sujeita.

Ainda segundo Arnedo, as longarinas são vigas simples que dão suporte às nervuras e são as partes de uma aeronave que suportam o carregamento mais pesado, sendo que este carregamento é muito maior na raiz do que na ponta. As longarinas suportam esforços de flexão e cisalhamento (SOLER, 2014).

Para prevenir a torção em uma asa, uma segunda longarina pode ser adicionada, dessa forma, os esforços que eram inicialmente de torção, passam a ser suportados como flexão das duas longarinas. Um exemplo da parte estrutural de um VANT tipo flying wing é mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Estrutura interna de um VANT tipo flying wing



Fonte: (LOPES, 2014).

Cálculo dos Índices de Mérito para nervuras e longarinas

O primeiro passo para a seleção de materiais proposta no trabalho foi a realização do cálculo dos Índices de Mérito para os componentes estruturais, no caso, as nervuras e longarinas.

Seguindo o método de Ashby, considerando o exemplo dado em (ASHBY, 2012) para um tirante leve e rígido, o mesmo deve suportar uma força de tração F^* sem falhar e, ao mesmo tempo, ser o mais leve possível.

Inicialmente, deve ser localizada uma equação que descreva a quantidade que deve ser otimizada, no caso em questão, a massa m . Tal equação é denominada *função objetivo* e no caso é:

$$m = A.L.\rho \quad (1)$$

Onde:

A = Área de seção transversal;

L = Comprimento;

ρ = Densidade do material.

O comprimento L e a força F são especificados e, dessa forma, fixos. A área de seção transversal A é livre, sendo assim, reduzir a massa passa diretamente por reduzir a área da seção transversal, porém, a área ainda deve suportar a carga F^* , então tem-se que:

$$\frac{F^*}{A} \leq \sigma_f \quad (2)$$

Onde:

σ_f = Resistência à falha.

De (2), pode-se escrever que:

$$A \geq \frac{\sigma_f}{F^*} \quad (3)$$

E substituindo (3) na equação (1), obtém-se:

$$m \geq (F^*) \cdot (L) \cdot \left(\frac{\sigma_f}{F^*}\right) \quad (4)$$

Observando o resultado obtido em (4), pode-se ver que o primeiro termo entre parênteses contém a restrição funcional do componente, no caso a força F^* especificada. O segundo parêntese traz o comprimento L que é a restrição geométrica. Ambos são requisitos de projeto, portanto são valores fixos, dessa forma, o componente mais leve possível e que suporte a carga F^* é feito do material que possuir o menor valor de $\frac{\sigma_f}{F^*}$. Normalmente, o índice de material é uma característica a ser maximizada (ASHBY, 2012), portanto, pode-se definir o Índice de Material (IM) como:

$$IM = \frac{F^*}{\sigma_f} \quad (5)$$

No presente trabalho, para calcular o índice de material de uma longarina, considerou-se a mesma como uma viga em flexão, com restrição de rigidez, que não deve sofrer uma deflexão muito grande ao ser sujeita a uma carga F e o objetivo é que a mesma seja o mais leve possível.

De forma análoga, para as nervuras, as mesmas podem ser consideradas como chapas metálicas sujeitas a esforços de flexão e flambagem, também com restrição de rigidez e não devendo sofrer grandes deflexões ao serem sujeitas a uma carga F . O objetivo novamente é que sejam o mais leve possível.

A Tabela 3 adaptada de Ferrante (FERRANTE, 2013), contém o IM objetivando a redução de peso com restrição de rigidez para diferentes tipos de carregamento. A partir dela é possível obter o índice de material para nervuras e longarinas que será utilizado no presente trabalho.

Tabela 3 – IM com minimização de peso para rigidez em diferentes modos de carregamento

Modo de carregamento	IM com Minimização de peso para rigidez
Barra em tração	$\frac{E}{\rho}$
Barra em torção	$\frac{G}{\rho}$
Tubo em torção	$\frac{G}{\rho}$
Viga em flexão	$\frac{1}{\rho} \frac{E^2}{E^2}$
Flambagem de coluna e tubo	$\frac{1}{\rho} \frac{E^2}{E^2}$
Chapa em flexão	$\frac{1}{\rho} \frac{E^3}{E^3}$
Flambagem de chapa	$\frac{1}{\rho} \frac{E^3}{E^3}$
Cilindro em rotação	$\frac{E}{\rho}$
Vaso de pressão cilíndrico	$\frac{E}{\rho}$
Vaso de pressão esférico	$\frac{E}{(1 - \nu) \cdot \rho}$

Fonte: Ferrante (FERRANTE, 2013), Adaptado pelo autor.

Desta forma:

Para longarinas:

$$IM_L = \frac{E^2}{\rho} \quad (6)$$

Para nervuras:

$$IM_N = \frac{E^3}{\rho} \quad (7)$$

Uma vez obtidas as fórmulas para calcular os Índices de Mérito, a etapa seguinte consistiu em selecionar materiais candidatos para fabricação dos componentes desejados, para isso, foi feito o uso da base de dados de materiais de engenharia do MatWeb, que permite obter dados de propriedades físicas e mecânicas, entre outras, de uma gama de materiais.

A figura 13 traz um recorte de uma página do MatWeb com propriedades físicas e mecânicas para uma liga de aço AISI 4340.

Figura 13 – Algumas propriedades do aço AISI 4340 no MatWeb

Physical Properties	Metric	English
Density	7.85 g/cc	0.284 lb/in ³
Mechanical Properties	Metric	English
Hardness, Brinell	321	321
Hardness, Knoop	348	348
Hardness, Rockwell B	99	99
Hardness, Rockwell C	35	35
Hardness, Vickers	339	339
Tensile Strength, Ultimate	1110 MPa	161000 psi
Tensile Strength, Yield	710 MPa	103000 psi
Elongation at Break	13.2 %	13.2 %
Reduction of Area	36 %	36 %
Modulus of Elasticity	200 GPa	29000 ksi
Bulk Modulus	159 GPa	23100 ksi
Poissons Ratio	0.29	0.29
Machinability	50 %	50 %
Shear Modulus	78.0 GPa	11300 ksi

Fonte: (MATWEB, 2023), adaptado pelo autor.

O MatWeb também permite filtrar sua busca de acordo com faixas de valores de algumas propriedades desejadas, com um limite de até 3 propriedades ao mesmo tempo, e exibir como resultado apenas os materiais cujas propriedades atendam simultaneamente as faixas de valores das propriedades requisitadas. No escopo deste trabalho, os Índices de Material tanto para nervuras quanto para longarinas são dados em função da densidade (ρ) e do módulo de elasticidade (E).

Figura 14 – Página de pesquisa de materiais por propriedades do MatWeb**Property Search**

Try these other methods of searching:

- [Advanced Search](#) - Allow searches on conditional property data, using multiple criteria.
- [Polymer Film Search](#)
- [Lubricant Search](#)

Choose a Material Category (Optional)

- Carbon (866 mats)
- Ceramic (10004 mats)
- Fluid (7562 mats)
- Metal (17052 mats)
- Other Engineering Material (8063 mats)
- Polymer (97635 mats)
- Pure Element (507 mats)

Choose up to 3 Material Properties
Set the range by entering the minimum and/or maximum values for each selected property.

Density (108227 mats)
Min: Max: Unit: g/cc
Min: 0.0000820 g/cc
Max: 22.6 g/cc

Modulus of Elasticity (41250 mats)
Min: Max: Unit: GPa
Min: 7.50e-7 GPa
Max: 1200 GPa

Submit the Query (Required)
Click on the 'Find' button below to submit the query.

FIND **RESET**

Fonte: (MATWEB, 2023), adaptado pelo autor.

Utilizando a ferramenta de busca mostrada na imagem acima, buscou-se escolher de diferentes classes para cálculo dos Índices de Mérito.

Uma vez obtidos os materiais, a etapa seguinte foi a classificação dos mesmos de acordo com os Índices de Mérito, para isso, fez-se o uso do Excel utilizando os valores de E e ρ para calcular os valores IM para longarinas e nervuras e classificá-los de acordo com os maiores índices.





Tabela 4 – Dados dos materiais selecionados para análise

Material	E (Gpa)	ρ (g/cm ³)	IM_L	IM_N
Aluminum 1350-H111	69	2,7	3,07	1,516
Aluminum 2024-T6	72,4	2,78	3,06	1,499
Aluminum 3004-H112	70	2,72	3,075	1,515
Aluminum 4032-T6	78,6	2,68	3,308	1,598
Aluminum 5356	70	2,64	3,169	1,561
Aluminum 6009-T6	69	2,71	3,065	1,513
Aluminum 7075-T6	71,7	2,81	3,013	1,478
ASTM class 40 cast iron	138	7,15	1,642	0,722
AISI 1020 Steel	186	7,87	1,732	0,725
304 Stainless Steel	193	8	1,736	0,722
AISI 4340 Steel	200	7,85	1,801	0,744
Titanium Ti-6Al-4V	113,8	4,43	2,408	1,093

Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	113,8	4,54	2,349	1,067
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	110,3	4,54	2,313	1,056
Carbon epoxy (61%)	142	1,6	7,447	3,26
Glass-filled epoxy (35%)	25	1,9	2,631	1,538
Glass-filled polyester (35%)	15,7	2	1,981	1,251
Glass-filled nylon (35%)	14,5	1,6	2,379	1,524
S-glass epoxy (45%)	39,5	1,8	3,491	1,892

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Preenchimento da tabela de acordo com cada classe de material

Classe de material	Preenchimento
Alumínio	
Aços e ferros fundidos	
Titânio	
Compósitos	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os índices de mérito, como já explicado anteriormente, representam o quão bem um dado material cumpre a função desejada de acordo com os objetivos e requisitos de projeto, porém, para uma escolha mais adequada, considerar outras variáveis pode ser de fundamental importância. Considerando que, no presente trabalho, os materiais devem ser selecionados para componentes estruturais de VANTS, outras três variáveis além dos Índices de Mérito foram consideradas: o custo, a dificuldade de fabricação e a resistência à corrosão.

Para incluir estas outras variáveis, foi utilizada uma matriz de decisão de Pahl & Beitz de escala 5, com as notas atribuídas para os materiais mostradas na imagem abaixo.

Tabela 6 – Notas dos materiais para cada variável

Material	Resistência à corrosão	Custo	Dificuldade de fabricação
Aluminum 1350-H111	3	3	3
Aluminum 2024-T6	3	3	3
Aluminum 3004-H112	3	3	3
Aluminum 4032-T6	3	3	3
Aluminum 5356	3	3	3
Aluminum 6009-T6	3	3	3
Aluminum 7075-T6	3	3	3
ASTM class 40 cast iron	1	4	3
AISI 1020 Steel	1	4	3
304 Stainless Steel	4	1	2
AISI 4340 Steel	1	4	3
Titanium Ti-6Al-4V	4	0	0
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	4	0	0
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	4	0	0
Carbon epoxy (61%)	3	0	2
Glass-filled epoxy (35%)	3	1	2
Glass-filled polyester (35%)	3	1	2
Glass-filled nylon (35%)	3	1	2
S-glass epoxy (45%)	3	1	2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como o trabalho tem o intuito de classificar os materiais candidatos, dentre os que cumprem aos requisitos de projeto estabelecidos e auxiliar a melhor escolha de material para diferentes requisitos de projeto, os pesos de cada variável são definidos pela pessoa responsável pela seleção de acordo com o que se deseja priorizar. De maneira análoga, também é permitido definir o valor mínimo de E e o valor máximo de ρ , da maneira mostrada na Tabela 7.

Tabela 7 – Exemplo de valores para os requisitos e pesos dos critérios

REQUISITOS		PESO DOS CRITÉRIOS			
E (Gpa)	ρ (g/cm ³)	IM	Resistência à corrosão	Custo	Dificuldade de fabricação
>70	<3	0,5	0,3	0,1	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Uma vez definidos os valores de E e ρ e os pesos de cada variável, o modelo seleciona os materiais que cumprem os requisitos e os classifica de acordo com a maior pontuação como exibido na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação dos materiais que atendem aos requisitos pelo exemplo dado na Tabela 7

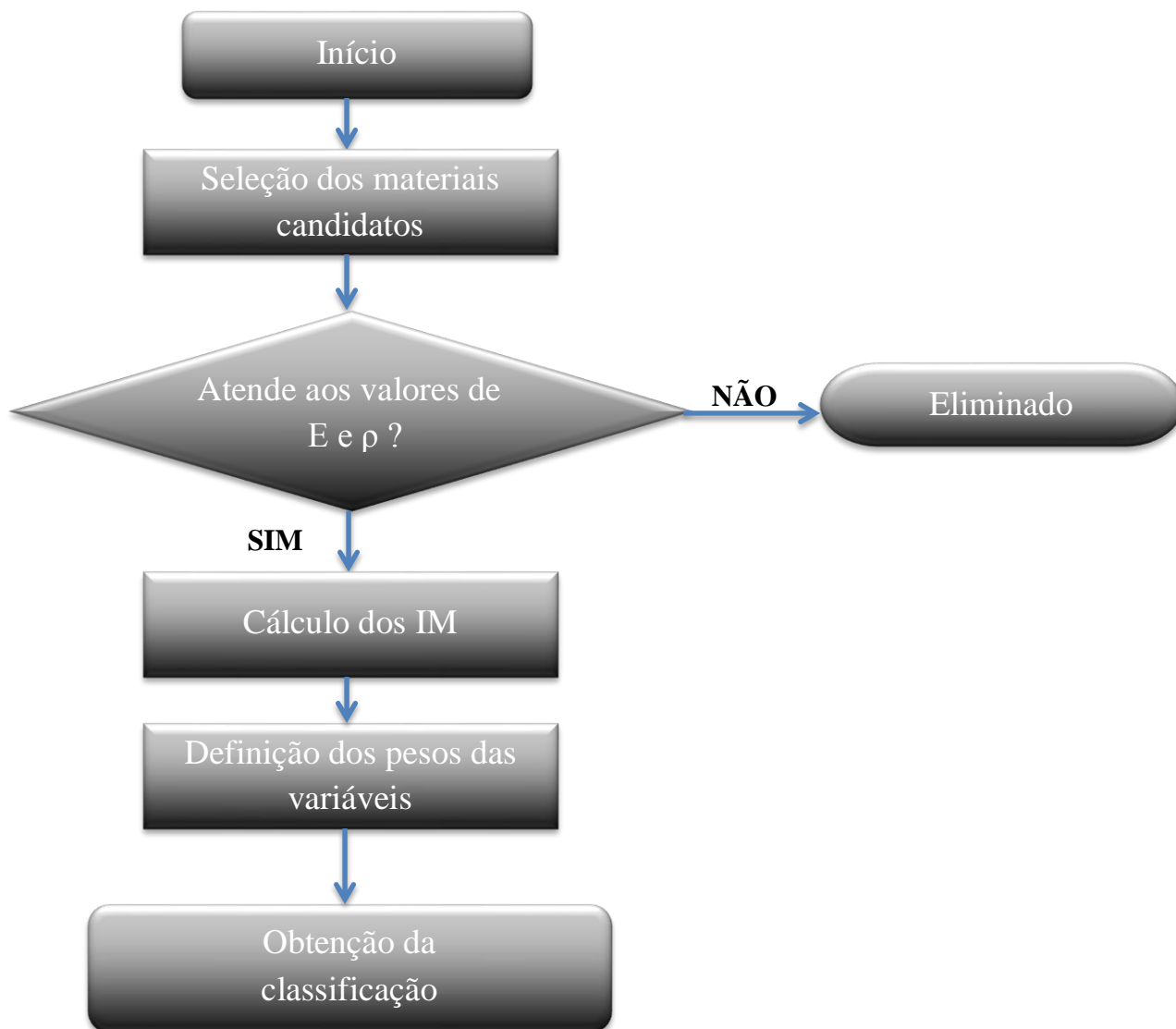
Material	E (Gpa)	ρ (g/cm³)	IM_L	Pontuação_L
Carbon epoxy (61%)	142	1,6	7,447	5,223
Aluminum 4032-T6	78,6	2,68	3,308	3,754
Aluminum 2024-T6	72,4	2,78	3,06	3,63
Aluminum 7075-T6	71,7	2,81	3,013	3,606

Fonte: Elaborada pelo autor.

O método implementado pode ser sintetizado como uma etapa inicial de seleção preliminar de materiais de diferentes classes e subclasses, seguida de uma etapa de triagem onde são definidos o valor mínimo do módulo de elasticidade e o valor máximo de densidade desejados e os materiais que não cumprem os requisitos são eliminados, ao mesmo tempo pode se definir o peso que se deseja atribuir as variáveis IM, custo, resistência à corrosão e dificuldade de fabricação. Em seguida, é calculado o IM de cada um dos materiais dentre os que atendem aos valores definidos do módulo de elasticidade e da densidade.

Com o IM calculado e os valores atribuídos a todas as variáveis, obtém-se uma classificação dos materiais restantes de acordo com sua pontuação obtida através de um somatório entre a nota de cada material em uma variável e o peso atribuído a mesma. A Figura 15 traz um diagrama ilustrativo dos passos até a classificação dos materiais:

Figura 15 – Ilustração dos passos até a obtenção da classificação dos materiais



Fonte: Elaborada pelo autor.

4. Análise dos Resultados

Uma vez desenvolvido o sistema para seleção de materiais, pôde-se analisar a melhor escolha de material para diferentes situações, desde diferentes requisitos de densidade e módulo de elasticidade até diferentes pesos para as demais variáveis avaliadas.

4.1 Densidade

Classificando os materiais selecionados pela densidade, obtemos o seguinte resultado.

Tabela 9 – Classificação dos materiais pela menor densidade

Material	E (Gpa)	ρ (g/cm³)
Carbon epoxy (61%)	142	1,6
Glass-filled nylon (35%)	14,5	1,6
S-glass epoxy (45%)	39,5	1,8
Glass-filled epoxy (35%)	25	1,9
Glass-filled polyester (35%)	15,7	2
Aluminum 5356	70	2,64
Aluminum 4032-T6	78,6	2,68
Aluminum 1350-H111	69	2,705
Aluminum 6009-T6	69	2,71
Aluminum 3004-H112	70	2,72
Aluminum 2024-T6	72,4	2,78
Aluminum 7075-T6	71,7	2,81
Titanium Ti-6Al-4V	113,8	4,43
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	113,8	4,54
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	110,3	4,54
ASTM class 40 cast iron	138	7,15
AISI 4340 Steel	200	7,85
AISI 1020 Steel	186	7,87
304 Stainless Steel	193	8

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao priorizar-se a leveza como principal requisito de projeto é possível destacar os materiais compósitos que apresentam valores mais baixos de densidade, seguidos com relativa proximidade pelas ligas de alumínio, enquanto que, por sua vez, as ligas de aço possuem valores de densidade bem maiores se apresentando alternativas inviáveis neste quesito.

4.2 Módulo de Elasticidade

Ao classificar os materiais pelo módulo de elasticidade como mostrado na Tabela 10, a situação se inverte em relação à densidade. É possível notar que as ligas de aço são que possuem valor mais elevado do atributo, enquanto a maioria dos compósitos apresentam valores abaixo das demais classes de material analisadas, com exceção ao compósito de epóxi-carbono que apresenta módulo de elasticidade tão elevado quanto as ligas de aço.

Tabela 10 – Classificação dos materiais pelo maior módulo de elasticidade

Material	E (Gpa)	ρ (g/cm ³)
AISI 4340 Steel	200	7,85
304 Stainless Steel	193	8
AISI 1020 Steel	186	7,87
Carbon epoxy (61%)	142	1,6
ASTM class 40 cast iron	138	7,15
Titanium Ti-6Al-4V	113,8	4,43
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	113,8	4,54
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	110,3	4,54
Aluminum 4032-T6	78,6	2,68
Aluminum 2024-T6	72,4	2,78
Aluminum 7075-T6	71,7	2,81
Aluminum 5356	70	2,64
Aluminum 3004-H112	70	2,72
Aluminum 1350-H111	69	2,7
Aluminum 6009-T6	69	2,71
S-glass epoxy (45%)	39,5	1,8
Glass-filled epoxy (35%)	25	1,9
Glass-filled polyester (35%)	15,7	2
Glass-filled nylon (35%)	14,5	1,6

Fonte: Elaborada pelo autor

4.3 Analisando somente pelo índice de mérito

Analisando a escolha do material levando apenas em consideração os índices de mérito, temos as seguintes classificações.

Para Longarinas:

Tabela 11 – Classificação dos materiais pelo índice de mérito para longarinas

Material	IM_L
Carbon epoxy (61%)	7,447
S-glass epoxy (45%)	3,491
Aluminum 4032-T6	3,308
Aluminum 5356	3,169
Aluminum 3004-H112	3,075
Aluminum 1350-H111	3,07
Aluminum 6009-T6	3,065
Aluminum 2024-T6	3,06
Aluminum 7075-T6	3,013
Glass-filled epoxy (35%)	2,631
Titanium Ti-6Al-4V	2,408
Glass-filled nylon (35%)	2,379
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	2,349
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	2,313
Glass-filled polyester (35%)	1,981
AISI 4340 Steel	1,801
304 Stainless Steel	1,736
AISI 1020 Steel	1,732
ASTM class 40 cast iron	1,642

Fonte: Elaborada pelo autor

Para Nervuras:

Tabela 12 – Classificação dos materiais pelo índice de mérito para nervuras

Material	IM_N
Carbon epoxy (61%)	3,26
S-glass epoxy (45%)	1,892
Aluminum 4032-T6	1,598
Aluminum 5356	1,561
Glass-filled epoxy (35%)	1,538
Glass-filled nylon (35%)	1,524
Aluminum 1350-H111	1,516
Aluminum 3004-H112	1,515
Aluminum 6009-T6	1,513
Aluminum 2024-T6	1,499
Aluminum 7075-T6	1,478
Glass-filled polyester (35%)	1,251
Titanium Ti-6Al-4V	1,093
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	1,067
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	1,056
AISI 4340 Steel	0,744
AISI 1020 Steel	0,725
ASTM class 40 cast iron	0,722
304 Stainless Steel	0,722

Fonte: Elaborada pelo autor

Como o índice de mérito é diferente para nervuras e longarinas, a classificação dos materiais também apresenta pequenas variações. Em ambos os casos, no entanto, é possível notar um destaque para o compósito de epóxi-carbono que apresenta maior índice de mérito em ambos os componentes; também pode se ressaltar que em ambos os casos os materiais compósitos e as ligas de alumínio aparecem como principais candidatos.

4.4. Analisando as pontuações ao dar maior importância ao índice de mérito

Tabela 13 – Exemplo de peso dos critérios para priorizar o IM

PESO DOS CRITÉRIOS			
IM	Resistência à corrosão	Custo	Dificuldade de fabricação
0,7	0,1	0,1	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor

Ao aplicar-se os pesos dos critérios mostrados na tabela 13 com o intuito de dar um peso muito maior ao índice de mérito em relação as demais variáveis, foram obtidas as seguintes classificações:

Para Longarinas:

Tabela 14 – Classificação dos materiais pela pontuação obtida por meio dos pesos dos critérios da Tabela 13 para longarinas

Material	Pontuação_L
Carbon epoxy (61%)	5,713
Aluminum 4032-T6	3,215
Aluminum 5356	3,118
Aluminum 3004-H112	3,053
Aluminum 1350-H111	3,049
Aluminum 6009-T6	3,045
S-glass epoxy (45%)	3,044
Aluminum 2024-T6	3,042
Aluminum 7075-T6	3,009
Glass-filled epoxy (35%)	2,442
Glass-filled nylon (35%)	2,265
Titanium Ti-6Al-4V	2,085
AISI 4340 Steel	2,061
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	2,044
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	2,019
AISI 1020 Steel	2,013
Glass-filled polyester (35%)	1,986
ASTM class 40 cast iron	1,95
304 Stainless Steel	1,915

Fonte: Elaborada pelo autor

Para Nervuras:

Tabela 15 – Classificação dos materiais pela pontuação obtida por meio dos pesos dos critérios da Tabela 13 para nervuras

Material	Pontuação_N
Carbon epoxy (61%)	2,782
Aluminum 4032-T6	2,018
Aluminum 5356	1,992
Aluminum 1350-H111	1,961
Aluminum 3004-H112	1,96
Aluminum 6009-T6	1,959
Aluminum 2024-T6	1,949
Aluminum 7075-T6	1,934
S-glass epoxy (45%)	1,924
Glass-filled epoxy (35%)	1,677
Glass-filled nylon (35%)	1,666
Glass-filled polyester (35%)	1,476
AISI 4340 Steel	1,321
AISI 1020 Steel	1,307
ASTM class 40 cast iron	1,305
304 Stainless Steel	1,205
Titanium Ti-6Al-4V	1,165
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	1,147
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	1,139

Fonte: Elaborada pelo autor

Nota-se novamente uma maior pontuação para os materiais compósitos e as ligas de alumínio.

4.5 Priorizando Custo

Em projetos em que o baixo custo dos componentes é prioridade, podemos aumentar o peso do mesmo em relação às demais variáveis e obter uma listagem de materiais visando priorizar este requisito. A Tabela 16 mostra uma alternativa de valores de peso das variáveis visando priorizar o baixo custo.

Tabela 16 – Exemplo de peso dos critérios para priorizar o custo

PESO DOS CRITÉRIOS			
IM	Resistência à corrosão	Custo	Dificuldade de fabricação
0,1	0,1	0,7	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 17 e na Tabela 18 pode-se ver a classificação dos materiais com as pontuações sendo calculadas de acordo com os pesos da tabela acima.

Para longarinas:

Tabela 17 – Classificação dos materiais pela pontuação obtida por meio dos pesos dos critérios da Tabela 16 para longarinas

Material	Pontuação_L
AISI 4340 Steel	3,38
AISI 1020 Steel	3,373
ASTM class 40 cast iron	3,364
Aluminum 4032-T6	3,031
Aluminum 5356	3,017
Aluminum 3004-H112	3,008
Aluminum 1350-H111	3,007
Aluminum 6009-T6	3,007
Aluminum 2024-T6	3,006
Aluminum 7075-T6	3,001
S-glass epoxy (45%)	1,549
304 Stainless Steel	1,474
Glass-filled epoxy (35%)	1,463
Glass-filled nylon (35%)	1,438
Glass-filled polyester (35%)	1,398
Carbon epoxy (61%)	1,245
Titanium Ti-6Al-4V	0,641
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	0,635
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	0,631

Fonte: Elaborada pelo autor

Para nervuras:

Tabela 18 – Classificação dos materiais pela pontuação obtida por meio dos pesos dos critérios da Tabela 16 para nervuras

Material	Pontuação_N
AISI 4340 Steel	3,274
AISI 1020 Steel	3,273
ASTM class 40 cast iron	3,272
Aluminum 4032-T6	2,86
Aluminum 5356	2,856
Aluminum 1350-H111	2,852
Aluminum 3004-H112	2,852
Aluminum 6009-T6	2,851
Aluminum 2024-T6	2,85
Aluminum 7075-T6	2,848
S-glass epoxy (45%)	1,389
304 Stainless Steel	1,372
Glass-filled epoxy (35%)	1,354
Glass-filled nylon (35%)	1,352
Glass-filled polyester (35%)	1,325
Carbon epoxy (61%)	0,826
Titanium Ti-6Al-4V	0,509
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	0,507
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	0,506

Fonte: Elaborada pelo autor

Podemos notar que em ambos os componentes, as ligas de aço e de alumínio aparecem como principais candidatas, sendo que na classificação das nervuras as ligas de aço aparecem, inclusive, com uma pontuação ligeiramente superior se comparado com as ligas de alumínio, enquanto que as ligas de titânio aparecem com as pontuações mais baixas.

4.6 Priorizando a resistência à corrosão

A resistência à corrosão é sempre fator determinante em projetos mecânicos e a depender da missão da aeronave pode ser um dos fatores prioritários, dessa forma, ao definir os pesos das variáveis de forma a dar maior prioridade a esta variável. A Tabela 19 mostra uma possível definição de peso dos critérios de forma a dar maior prioridade à resistência à corrosão.

Tabela 19 – Exemplo de peso dos critérios para priorizar a resistência à corrosão

PESO DOS CRITÉRIOS			
IM	Resistência à corrosão	Custo	Dificuldade de fabricação
0,1	0,7	0,1	0,1

Fonte: Elaborada pelo autor

Na Tabela 20 e na Tabela 21 pode-se ver a classificação dos materiais com as pontuações sendo calculadas de acordo com os pesos da tabela acima.

Para longarinas:

Tabela 20 – Classificação dos materiais pela pontuação obtida por meio dos pesos dos critérios da Tabela 19 para longarinas

Material	Pontuação_L
304 Stainless Steel	3,274
Carbon epoxy (61%)	3,045
Titanium Ti-6Al-4V	3,041
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	3,035
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	3,031
Aluminum 4032-T6	3,031
Aluminum 5356	3,017
Aluminum 3004-H112	3,008
Aluminum 1350-H111	3,007
Aluminum 6009-T6	3,007
Aluminum 2024-T6	3,006
Aluminum 7075-T6	3,001
S-glass epoxy (45%)	2,749
Glass-filled epoxy (35%)	2,663
Glass-filled nylon (35%)	2,638
Glass-filled polyester (35%)	2,598
AISI 4340 Steel	1,58
AISI 1020 Steel	1,573
ASTM class 40 cast iron	1,564

Fonte: Elaborada pelo autor

Para nervuras:

Tabela 21 – Classificação dos materiais pela pontuação obtida por meio dos pesos dos critérios da Tabela 19 para nervuras

Material	Pontuação_N
304 Stainless Steel	3,172
Titanium Ti-6Al-4V	2,909
Titanium Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	2,907
Titanium Ti-6Al-6V-2Sn (Ti-6-6-2)	2,906
Aluminum 4032-T6	2,86
Aluminum 5356	2,856
Aluminum 1350-H111	2,852
Aluminum 3004-H112	2,852
Aluminum 6009-T6	2,851
Aluminum 2024-T6	2,85
Aluminum 7075-T6	2,848
Carbon epoxy (61%)	2,626
S-glass epoxy (45%)	2,589
Glass-filled epoxy (35%)	2,554
Glass-filled nylon (35%)	2,552
Glass-filled polyester (35%)	2,525
AISI 4340 Steel	1,474
AISI 1020 Steel	1,473
ASTM class 40 cast iron	1,472

Fonte: Elaborada pelo autor

Tanto para longarinas, quanto para nervuras, nota-se um melhor desempenho de uma liga de aço inoxidável, seguida pelas ligas de titânio, tal resultado é esperado devido a serem, dentre os analisados, os materiais com maior resistência à corrosão, porém, é possível notar também que a diferença de pontuação, no cenário analisado, entre as ligas de titânio e as ligas de alumínio se dá na casa dos centésimos.

5. Conclusões

De acordo com os diferentes cenários analisados, observou-se que o material mais indicado para cada componente variou de acordo com os requisitos e necessidades de projeto pré-definidos. Para os casos onde um elevado valor de E foi priorizado, observou-se que a quantidade de candidatos que atendem aos requisitos ficou limitada. O mesmo vale para quando se dá uma alta priorização para um baixo valor de ρ .

Olhando para os índices de mérito, os materiais compósitos se destacam por serem mais leves e possuir uma alta relação E/ρ , sendo sua maior limitação ainda o custo. As ligas de aço, apesar de apresentarem altos valores de E e, em sua maioria, custo mais baixo que as demais classes de material utilizadas, seus valores de densidade são extremamente altos em relação às ligas de alumínio e aos materiais compósitos, fator que inviabiliza sua utilização para a finalidade proposta no trabalho. As ligas de titânio, apesar de possuírem altos índices de resistência à corrosão, possuem alto custo e a fabricação de componentes utilizando da mesma é difícil, o que inviabiliza sua utilização nos componentes analisados no escopo do presente trabalho.

Em todos os cenários analisados, o alumínio apareceu como boa alternativa, tendo uma baixa diferença de pontuação para os melhores classificados. Este é um resultado esperado visto que este material tem boas características no que diz respeito a leveza, rigidez/resistência, com custo não tão elevado. A boa resistência à corrosão e facilidade de se fabricar componentes no mesmo também é um fator importante. A última etapa da análise via método de Ashby é a etapa de documentação, onde os principais candidatos são analisados de acordo com seus dados e histórico de utilização; e para uso em estruturas aeronáuticas as duas ligas dentre as analisadas que possuem histórico de utilização são as ligas Al-2024 e Al-7075.

Nos dias atuais, a maior parte das chapas e componentes estruturais da asa de uma aeronave é fabricada em alumínio e as ligas de alumínio mais utilizadas são a 2024 e 7075, porém, há uma tendência de crescimento de uso de materiais compósitos, principalmente os compósitos com Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC). Dessa forma, pode-se concluir que os resultados obtidos no presente trabalho

são condizentes com o que de fato costuma ser utilizado na fabricação dos componentes.

As maiores dificuldades encontradas se deram na definição das notas dos materiais nas variáveis custo, resistência à corrosão e dificuldade de fabricação, pois é difícil obter dados confiáveis em seus valores, além disso, a dificuldade de fabricação é algo subjetivo. Ademais, o método implementado se limita a uma classificação quantitativa, porém, a escolha final deve passar por uma análise da documentação do material e histórico de utilização de modo a entender as características de cada um em serviço e verificar sua adequação a aplicação.

Como sugestões de trabalhos futuros, pode-se considerar um maior número de materiais e/ou componentes aeronáuticos para cálculo dos índices de mérito e posterior análise dos principais candidatos com demais variáveis, ou aumentar a quantidade de variáveis analisadas.

6. Referências

- [1] Aero. **Inteligência da informação aplicada a engenharia.** Disponível em <<https://aeroengenharia.com/drones-tecnicas-de-aerolevantamento-em-mineracao>>. Acesso em: 01 de set. 2023
- [2] ANAC, **Siglas português.** Disponível em <https://www2.anac.gov.br/anacpedia/sig_por/tr1324.htm>. Acesso em: 10 de jan. 2023.
- [3] Ansys, inc. **Introdução ao Granta Edupack.** Disponível em <Introdução ao Granta EduPack (ansys.com)>. Acesso em: 28 de jun. de 2024.
- [4] Ashby, M. F. **Seleção de materiais no projeto mecânico.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- [5] BBC. **The V1 flying bomb.** Disponível em <<https://www.bbc.co.uk/programmes/w3cszmvv>>. Acesso em: 15 de mar. 2023.
- [6] Buzzo, Lucas. **História dos Drones: do início aos dias de hoje,** disponível em <<https://odrones.com.br/historia-dos-drones/>>, Acesso em: 13 de mar. 2023
- [7] Callister Jr, William D, RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais – uma introdução.** 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- [8] Compósitos VCI. **Como os compósitos são usados na aviação.** Disponível em <<https://compositesvci.com.br/como-os-compositos-sao-usados-na-aviacao/>>. Acesso em: 10 de set. 2023.
- [9] DARPA, **About DARPA,** disponível em <<https://www.darpa.mil/about-us/about-darpa.>>, Acesso em: 13 de mar. 2023.
- [10] Departamento de Controle do Espaço Aéreo. **Qual a diferença entre drone, VANT e RPAS?** Disponível em: <[Qual a diferença entre drone, VANT e RPAS? – Central de Ajuda DECEA](#)>. Acesso em: 20 de jan. de 2024.
- [11] Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE. **Drones.** Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/sensores-plataformas/drones#:~:text=Os%20Drones%20ou%20ve%C3%ADculos%20a%C3%A9reos,%2C%20monitoramento%20ambiental%2C%20entre%20outras.>> Acesso em: 15 de mar. 2023.
- [12] Fan, Ricardo. **SARP: uma nova ameaça no campo de batalha do século XXI.** Disponível em <[SARP: uma nova ameaça no campo de batalha do século XXI - DefesaNet](#)>. Acesso em: 20 de jan. de 2024.

- [13] FERRANTE, Maurizio. **Seleção dos Materiais de Construção Mecânica: Estratégias e Metodologia Básica**, 2000. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/sel_mat_con_mec.html>. Acesso em: 14 de jul. 2023.
- [14] Ferrante, Maurizio. **Seleção de materiais**. 3. ed. São Carlos, SP: Ed. da UFSCar, 2013.
- [15] Formação de Piloto. **Capítulo II – A Estrutura do Avião**. Disponível em <<https://formacaopiloto.blogspot.com/2014/07/aeronaves-e-motores-capitulo-ii.html>> Acesso em: 08 de set. 2023.
- [16] Hangar MMA. **QUAL A LIGA MAIS USADA NA CONSTRUÇÃO DE AERONAVES E POR QUE?** Disponível em <<https://hangarmma.com.br/blog/liga-mais-usada-na-construcao-de-aeronaves/>> . Acesso em: 10 de set. 2023.
- [17] Jansson, Göran.. **The V1 missile or "The Buzz Bomb**. Disponível em: <<http://www.zenza.se/vw/>>. Acesso em: 12 de mar 2023.
- [18] JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R. Y.. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. Disponível em <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/114264/1/CAP-8.pdf>>. Acesso em: 10 de jan. 2023.
- [19] Lopes, Bruno Oliveira. **Projeto Conceitual de VANT Tipo Asa Voadora para Construção em Impressora 3D**. Universidade Federal de Campina Grande. 2014.
- [20] MatWeb. **Online Materials Information Resource**. Disponível em <<https://www.matweb.com/>> . Acesso em: 06 de set. 2023.
- [21] Rodrigues, Filipe Santiago. **VANT; DE SUA CRIAÇÃO AOS DIAS ATUAIS**. Tese (Bacharel em Ciências Aeronáuticas) - Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça, p.45. 2020.
- [22] Sistema de Armas. **HUNTER KILLER**. Disponível em <[HUNTER KILLER \(sistemasdearmas.com.br\)](http://sistemasdearmas.com.br)>. Acesso em: 20 de jan. de 2024.
- [23] Soler, Manuel. **Fundamentals of Aerospace Engineering: An introductory course to aeronautical engineering**. Manuel Soler, 2014.
- [24] Sousa, Henrique Lima de. **Sensoriamento Remoto com VANTs: uma nova possibilidade para a aquisição de geoinformações**. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbgeo/article/view/5511>>, Acesso em: 15 de mar. 2023.