



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

VITOR RIBEIRO DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO DE
SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA UM CARRINHO DE ROLIMÃ**

**JOÃO PESSOA– PB
2024**

VITOR RIBEIRO DOS SANTOS

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO DE
SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA UM CARRINHO DE ROLIMÃ**

Monografia de graduação apresentada ao Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque.

**JOÃO PESSOA - PB
2024**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S237u Santos, Vitor Ribeiro Dos.

Utilização da metodologia Ashby no projeto de seleção de materiais para um carrinho de rolimã / Vitor Ribeiro Dos Santos. - João Pessoa, 2024.
25 f. : il.

Orientação: Siderley Albuquerque.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Seleção de materiais, Metodologia Ashby. I. Albuquerque, Siderley. II. Título.

UFPB/BSCT

CDU 621(043.2)

VITOR RIBEIRO DOS SANTOS

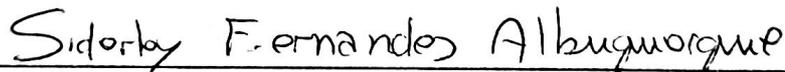
**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO DE
SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA UM CARRINHO DE ROLIMÃ**

Monografia de graduação apresentada ao Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

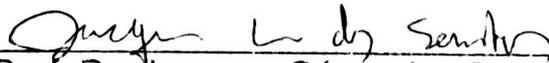
Orientador: Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque.

João Pessoa, 13 de Outubro de 2024

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Siderley Fernandes Albuquerque (Orientador)
Professor do Magistério Superior



Prof. Dr. Jacques César dos Santos (Avaliador)
Professor do Magistério Superior



Prof. Dr. Jean Pierre Veronese (Avaliador)
Professor do Magistério Superior

Dedico aos meus pais, Luiz Fernando Moreira dos Santos e Ana Cristina dos Santos Ribeiro, meus irmãos, Leonardo Ribeiro dos Santos e Daniel Ribeiro dos Santos, e à minha noiva, Ingrid Sakimoto Garcia. Devo tudo a eles, sem os mesmos, nada seria possível.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao meu pai por estar cuidando de mim, onde quer que ele esteja. Agradeço também à minha família: Ana, Daniel, Dilcéia, Ingrid e família, Leonardo, por me darem o apoio necessário para superar qualquer obstáculo que a vida proporciona.

Aos meus outros irmãos que a vida me deu, principalmente Abhner, Brayner, Caique, Henrique, Jefferson, Nilo, Zezuca, Luiz Felipe, Bruna, Teo e Milena, que sempre me deram o máximo de apoio possível em todos os momentos, principalmente para acabar o TCC.

Ao meu orientador, Professor Doutor Siderley Fernandes Albuquerque, por possibilitar a conclusão deste trabalho de curso. Sem o seu apoio, não teria sido possível finalizá-lo. Agradeço também ao Prof. Dr. Jacques César dos Santos e ao Gustavo Carvalho Pereira por terem participado da banca avaliadora.

À Dilma, por ter cuidado de mim e do meu pai durante tantos anos, e por continuar, até hoje, a me dar suporte quando preciso e pelas boas conversas e conselhos.

Aos meus amigos não mencionados anteriormente, que, mesmo sem saber, foram de extrema importância na minha jornada até aqui, eu não seria o mesmo sem eles.

Por fim, gostaria de agradecer ao dom da vida e pela experiência de ter conhecido pessoas tão maravilhosas, que me receberam em suas existências.

RESUMO

O propósito deste estudo é empregar a abordagem Ashby para a seleção de materiais em um carrinho de rolimã. Dado o vasto leque de materiais atualmente disponíveis no mercado, o pesquisador Michael Farries Ashby desenvolveu uma metodologia sistemática, conhecida como Metodologia Ashby, para orientar a escolha de materiais em projetos. Este estudo de caso aplicou essa metodologia com o principal objetivo de otimizar o peso do projeto, enquanto também descrevia o desenvolvimento da Metodologia Ashby e incentivava sua aplicação no currículo de graduação em engenharia mecânica da UFPB. A aplicação da metodologia foi conduzida por meio da análise dos diagramas de propriedades dos materiais fornecidos no livro de Ashby, sem a dependência de um software especializado em seleção de materiais. Além disso, o projeto foi focado principalmente na escolha do material para atender os requisitos mecânicos e ao objetivo de minimizar massa do carrinho, sem ter em vista a geometria, o processo de fabricação, usinagem e conformação do material para tal aplicação. Assim, o carrinho foi dividido em duas partes, o painel central e as vigas de sustentação. E, para ambas as partes, o material que sobressaiu e teve um melhor resultado, entre todos os materiais classificados e documentados, foi o Bambu. Um material renovável de rápido crescimento que é barato e já utilizado para aplicações semelhantes.

Palavras-chave: Seleção de materiais. Metodologia Ashby. Carrinho de rolimã. Engenharia mecânica. Otimização. Minimização de massa.

ABSTRACT

The purpose of this study is to employ the Ashby approach for material selection in a soapbox cart. Given the wide range of materials currently available in the market, the researcher Michael Farries Ashby developed a systematic methodology, known as the Ashby Methodology, to guide the selection of materials in projects. This case study applied this methodology with the main goal of optimizing the project's weight, while also describing the development of the Ashby Methodology and encouraging its application in the undergraduate mechanical engineering curriculum at UFPB. The application of the methodology was carried out through the analysis of material property charts provided in Ashby's book, without relying on specialized material selection software. Furthermore, the project was primarily focused on the choice of material to meet the mechanical requirements and the objective of minimizing the cart's weight, without considering the geometry, manufacturing process, machining, or forming of the material for this application. Thus, the cart was divided into two parts: the central panel and the support beams. For both parts, the material that stood out and yielded the best results, among all classified and documented materials, was bamboo. A fast-growing renewable material that is inexpensive and already used for similar applications.

Keywords: Material selection. Ashby Methodology. Soapbox cart. Mechanical engineering. Optimization. Weight minimization.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1: Carrinho de rolimã moderno	12
Figura 2: Carrinho de rolimã recreativo simples.	14
Figura 3:Criança andando de carrinho de rolimã.....	15
Figura 4:Processo de seleção de material.....	18
Figura 5: Processo de tradução na seleção de materiais.	20
Figura 6: Fontes de documentação.	22
Figura 7: Componentes genéricos e suas cargas.....	23
Figura 8: Exemplos de índices de material	27
Figura 9: Diagrama de barras de Módulo de Young para alguns materiais....	28
Figura 10: gráfico de módulo de Young X densidade	29
Figura 11: Gráfico do módulo de Young X Densidade.....	39
Figura 12: Gráfico de E em relação à ρ , com os índices de materiais.....	41

QUADROS

Quadro 1: Quadro de requisitos da placa central.	30
Quadro 2: Documentação de materiais placa central.	35
Quadro 3: Requisitos para as vigas.	38
Quadro 4: Documentação dos materiais das vigas.	42

TABELAS

Tabela 1: Materiais classificados para a documentação.....	34
Tabela 2: Materiais classificados para a documentação.....	42

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	10
1.1.	Objetivos Gerais.....	12
1.2.	Objetivos Específicos	13
1.3.	Motivação e justificativa	13
1.3.1.	Carrinhos de Rolimã.....	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1.	Seleção de material no projeto mecânico	16
2.2.	Metodologia Ashby	17
2.2.1.	Tradução	19
2.2.2.	Triagem	20
2.2.3.	Classificação	20
2.2.4.	Documentação	21
2.3.	Índices de material	22
2.4.	Diagramas de propriedade de materiais	27
3.	METODOLOGIA.....	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
4.1.	Placa central.....	30
4.1.1.	Tradução	30
4.1.2.	Triagem	31
4.1.3.	Classificação	32
4.1.4.	Documentação	35
4.2.	Vigas	38
4.2.1.	Tradução	38
4.2.2.	Triagem	38

4.2.3.	Classificação	39
4.3.	Documentação	42
4.4.	Análise Geral.....	45
5.	CONCLUSÃO.....	46
	BIBLIOGRAFIA	48

1. INTRODUÇÃO

A história da engenharia de materiais e sua importância nos projetos mecânicos remontam aos primórdios da civilização humana, tamanha importância que, segundo uma divisão clássica da historiografia francesa, nomeia períodos históricos. De acordo com SOUZA (s.d.), desde os tempos antigos, as pessoas têm explorado e manipulado materiais naturais para criar ferramentas, armas, estruturas e dispositivos que atendam às suas necessidades. A idade da pedra, por exemplo, marcou o uso de materiais como pedra, madeira e ossos para criar as primeiras ferramentas e armas. Com o passar do tempo, a humanidade avançou para a idade do bronze e do ferro, explorando materiais metálicos para forjar utensílios cada vez mais avançados. O domínio da metalurgia e a revolução industrial do século XVIII marcaram um ponto de virada significativo, com a introdução de materiais como aço e ferro fundido em projetos mecânicos, possibilitando máquinas, locomotivas e estruturas inovadoras.

Os materiais desempenham um papel crítico na determinação do desempenho, da durabilidade e da segurança dos produtos. A escolha adequada de materiais pode afetar a eficiência, a resistência e a confiabilidade das máquinas e estruturas. Além disso, os avanços na engenharia de materiais permitiram o desenvolvimento de novos materiais compostos, materiais supercondutores, materiais biomédicos e muito mais, expandindo os limites do que é possível em projetos mecânicos.

No meio esportivo, muitas competições incentivam a pesquisa e, como citado pela organização Master (s.d.), o aprimoramento e inovação de materiais, alguns dos muitos exemplos existentes são a corrida de bicicleta em velódromo nos jogos Olímpicos, os esportes paralímpicos, a vela e, um dos esportes mais conhecidos nesse aspecto, a Fórmula 1(F1). Para DEMARTINI (2015), no automobilismo, os materiais de projeto desempenham um papel de extrema importância. Eles são essenciais para a leveza dos carros, permitindo uma aceleração rápida e um menor consumo de combustível. Materiais como a fibra de carbono e ligas de alumínio são amplamente empregados na construção de chassis e carrocerias leves, mas altamente resistentes. Além disso, materiais compósitos avançados são usados em componentes aerodinâmicos para melhorar a aderência e a estabilidade em alta

velocidade. A segurança dos pilotos é garantida por materiais como o titânio, que proporciona resistência em situações de acidentes. Nos motores híbridos, materiais que suportem altas temperaturas e pressões são cruciais. Os pneus e os freios também dependem de materiais específicos para otimizar o desempenho. A F1 é um campo de constante inovação, onde equipes investem em pesquisa e desenvolvimento de novos materiais, buscando constantemente ganhos de eficiência e desempenho para ganhar vantagens competitivas na pista.

Assim como na F1, nos projetos de carrinhos de rolimã, a seleção de materiais tem extrema importância na otimização do desempenho e da segurança. Como menciona NETLELAND (2016) inicialmente construídos com tábuas de madeira simples, os chassis evoluíram para usar aço ou ligas de alumínio, oferecendo maior resistência e durabilidade sem adicionar peso excessivo. As rodas, antes de madeira, agora são frequentemente feitas de plástico ou borracha, e a incorporação de rolamentos de esferas reduz o atrito e aumenta a velocidade. Sistemas de freios, muitas vezes de plástico resistente, metal ou borracha, são adicionados para maior controle. Assentos e manoplas usam materiais confortáveis e aderentes para melhorar a experiência dos pilotos. Embora os carrinhos de rolimã sejam veículos simples, algumas pessoas e equipes incorporam princípios de aerodinâmica ao design, usando materiais leves e formatos mais aerodinâmicos.

A criatividade e a engenhosidade ainda desempenham um papel importante, permitindo uma grande diversidade de designs, desde carrinhos tradicionais até modelos mais sofisticados, como na figura 1 a seguir, tornando a experiência de descer ladeiras emocionante e segura.

Figura 1: Carrinho de rolimã moderno



Fonte: Imagem retirada da internet.

A ciência dos materiais evolui cada vez mais com o passar dos anos, desenvolvendo ou descobrindo novos materiais. Assim, vale ressaltar a importância da revisão da escolha de materiais durante os projetos, pois, faz-se necessário analisar projetos antigos em busca de melhorias que podem impactar o desempenho. Além disso, é presente a falta de métodos de seleção de materiais nos projetos, é comum utilizar o conhecimento empírico para tomar certas decisões, como a escolha do material. Com isso, Michael F. Ashby propõe a utilização da metodologia Ashby para a escolha do material, utilizando etapas bem definidas, focando na eliminação dos não conformes e maximização e otimização dos possíveis candidatos. Ele também leva em consideração o conflito de objetivos, forma e processamento do material no projeto, entre outros muitos fatores que podem impactar na escolha do material. Ele faz tudo isso utilizando gráficos e índices, facilitando a visualização, para demonstrar e escolher os melhores candidatos.

1.1. Objetivos Gerais

Utilizar a metodologia Ashby para escolher de forma sistemática o material utilizado na produção de um veículo de rolimã recreativo, tendo em vista a revisão dos materiais já utilizados atualmente. Será feito também uma análise do custo-benefício dos materiais.

1.2. Objetivos Específicos

- Demonstrar a metodologia Ashby para a seleção de materiais.
- Auxiliar o aprendizado de alunos da disciplina de seleção de materiais e áreas afins.
- Fazer uma análise crítica dos resultados obtidos.
- Auxiliar em futuros projetos de chapas e vigas.

1.3. Motivação e justificativa

Segundo psicólogos e psiquiatras, as brincadeiras de rua de antigamente são consideradas importantes para a formação de uma criança. Essas atividades ao ar livre oferecem uma gama de benefícios essenciais para o desenvolvimento infantil. Elas promovem o desenvolvimento físico, estimulam a socialização com outras crianças, fomentam a criatividade e a imaginação, proporcionam contato com a natureza, promovem a independência e a autonomia, e ajudam as crianças a aprenderem a seguir regras. No entanto, é importante equilibrar essas atividades com as preocupações de segurança atuais, garantindo ambientes supervisionados e seguros para que as crianças possam desfrutar dos benefícios das brincadeiras de rua.

A principal inspiração para esse projeto surgiu de uma boa recordação de momentos de família, que mesmo atualmente estando incompleta por conta da ausência de uma das pessoas que mais me apoiou a me graduar no curso de engenharia mecânica, meu pai, foi de tamanha importância para o meu desenvolvimento humano. Muitos artigos e livros mostram a importância das brincadeiras de rua no desenvolvimento infantil, assim, uma lembrança específica foi mais forte para a motivação, a memória de unir crianças da rua inteira além das crianças do colégio para descerem uma ladeira em skates e um carrinho de rolimã caseiro. Essa brincadeira específica foi impactante na infância de muitas crianças, pois muitas delas lembram desse momento mesmo após 20 anos. Unindo esse sentimento nostálgico à importância das brincadeiras de rua na formação infantil, foi fundamentação o suficiente para a definição do tema deste trabalho de conclusão de curso.

1.3.1. Carrinhos de Rolimã

A história das brincadeiras infantis no Brasil possui influência de uma gama de culturas ao longo dos séculos. Inicialmente, de acordo com o site Alô Bebê (2002), as crianças indígenas desfrutavam de atividades ligadas à natureza, como banhos de rio e brinquedos feitos à mão, como arco e flecha e bonecos de barro. Com a colonização portuguesa, surgiram brinquedos como pipas, bodoques e dominós. Os escravos negros trouxeram cantigas de ninar e personagens folclóricos como o saci-pererê e a cuca. No século 19, com a vinda da família real portuguesa, chegaram brinquedos europeus, como bolas de gude e bonecas de porcelana. Além disso, cantigas de roda e adivinhas foram introduzidas na cultura brasileira pelos imigrantes europeus. A chegada da bola de futebol no final do século 19 deixou uma marca duradoura, e surgiram outros brinquedos como bicicletas, carrinhos e trens de metal. No entanto, as crianças brasileiras continuaram a ser criativas, construindo seus próprios brinquedos, como carrinhos de rolimã, cavalos de pau e bonecas de pano. Essa rica herança cultural contribuiu para a diversidade e a vitalidade das brincadeiras infantis no Brasil.

Sabendo da importância das brincadeiras de criança para o desenvolvimento juvenil, o carrinho de rolimã impactou diretamente a vida de milhares de crianças a partir do final do século 19, por conta da falta de tecnologia e por se tratar de um brinquedo de recreação, eles eram feitos sem a necessidade de um projeto metódico e bem estruturado. Na figura 2 a seguir podemos ver um exemplar simples.

Figura 2: Carrinho de rolimã recreativo simples.



Fonte: Imagem retirada da internet.

Não havia a preocupação de melhorar o desempenho deles, mas apenas de que fosse funcional e fonte de entretenimento para as famílias. Muitos são os tipos de carrinhos, básico; personalizado; com volante; com freio, como o da figura 3 a seguir; de competição; caseiros; entre outros. Porém, o foco deste trabalho será o carrinho

básico e caseiro. O carrinho de rolimã usual, para recreação, é bastante simples, não possui nem freios, consiste simplesmente em uma chapa, quatro rolamentos e duas vigas, sendo a viga traseira fixa e a dianteira rotatória, para direcionar o brinquedo. A propulsão do carro é feita pela força da gravidade, o piloto leva o carrinho até o topo de uma ladeira, senta-se no carro, se posicionando completamente nele, e, caso a ladeira não seja íngreme o suficiente é comum o piloto se impulsionar com os pés ou com a mão. É preciso ter em mente que, para os carros sem freio, a escolha da ladeira é de extrema importância, pois, assim como a propulsão é feita basicamente sem interferência humana, a frenagem também é, fazendo com que a ladeira escolhida não possa ter um final curto e sim um nivelamento progressivo, nesses carros também é comum o uso de luvas protetoras que podem utilizar pastilhas na palma da luva para encostar no solo e proporcionar a frenagem do veículo. Já a direção do carrinho é feita, usualmente, pelos pés, onde cada pé empurra a barra no sentido que se pretende virar, por exemplo, se o piloto deseja ir para a direita, deve empurrar a barra no sentido horário. A figura 3 a seguir mostra um exemplar com freios.

Figura 3:Criança andando de carrinho de rolimã



Fonte: Imagem retirada da Internet

Mesmo se tratando de um carrinho caseiro e simplório, algumas poucas regras devem ser seguidas, regras essas que tornam realmente um carrinho qualquer ser considerado um carrinho de rolimã, ele deve possuir volante, para direcionar o veículo, deve ter menos de 2 metros de comprimento, suas rodas devem ser compostas especificamente de rolamentos e não podem ter nenhuma cobertura, como borracha ou plásticos, e por último, o carrinho não pode possuir superfícies cortantes ou pontiagudas que possam ferir de qualquer forma o piloto.

Algumas competições, como o evento de carrinhos de rolimã do município de Cachoeira do sul no Rio Grande do sul (2022), costumam colocar muito mais regras,

tendo em vista a segurança dos pilotos, sendo obrigatório, por exemplo, a instalação de freios dos dois lados do carrinho que sejam fortes e bem fixados, batentes no eixo para evitar que a viga dianteira rotacione demais, além de suportes para os pés. Elas não só criam regras relacionadas ao carrinho, mas também relacionadas ao vestuário do piloto, como a obrigatoriedade da utilização de capacete, calça comprida, sapato fechado, luvas que devem dar proteção às mãos. Há também a recomendação de utilização de itens adicionais como joelheiras, caneleiras e cotoveleiras.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Seleção de material no projeto mecânico

A seleção de materiais desempenha um papel fundamental no sucesso de um projeto mecânico, sendo um dos pilares que determina a viabilidade, desempenho e durabilidade de uma criação. Segundo Ashby (2012), percebemos que a escolha criteriosa dos materiais envolve uma análise abrangente das propriedades físicas, mecânicas e térmicas, além de considerações econômicas e ambientais. A seleção adequada impacta diretamente na eficiência do produto final, influenciando fatores como resistência, rigidez, durabilidade, tolerância a condições adversas e até mesmo a sustentabilidade. Com a evolução contínua das tecnologias e a diversificação das demandas, a compreensão profunda da seleção de materiais vem a ser um conhecimento importantíssimo para engenheiros e projetistas, em sua busca constante de otimizar seus projetos.

Uma seleção inadequada de materiais pode desencadear uma cascata de problemas que comprometem a integridade e o sucesso de um projeto. Desde um desempenho abaixo do esperado e falhas prematuras até custos elevados de manutenção e impactos ambientais negativos, as consequências são abrangentes e impactantes. De acordo com Ashby (2012), a escolha de materiais deve ser uma consideração metódica e criteriosa, levando em conta não apenas as propriedades técnicas, mas também os requisitos regulatórios, ambientais e de fabricação. Uma seleção bem-informada de materiais é vital para mitigar riscos, otimizar a eficiência e garantir a qualidade e durabilidade do produto final.

Sabendo disso, é comum ver materiais que antes eram frequentemente utilizados, em uma dada aplicação, serem substituídos por novos elementos, um exemplo presente na sociedade é o caso do quadro da bicicleta, que desde sua criação, já foi constituída de madeira, aço, alumínio, titânio, carbono, materiais compostos, ligas avançadas, materiais híbridos e materiais avançados, como o grafeno. A partir da mudança de compostos para alcançar objetivos diversos, desde redução de peso até aumento da resistência, pode-se perceber a importância da constante revisão e atualização da escolha de materiais.

Ashby (2012) argumenta que, muitas vezes, as decisões de seleção de materiais eram tomadas com base na intuição, experiência pessoal ou preferências individuais, o que poderia levar a escolhas subjetivas e, em última instância, a resultados insatisfatórios. Ele defende a adoção de uma abordagem mais científica e baseada em dados, utilizando critérios quantitativos para avaliar e comparar as propriedades dos materiais em relação aos requisitos do projeto. Em contrapartida à seleção intuitiva, ele defende a adoção de uma metodologia sistemática, um procedimento que possa ser facilmente aprendido, que forneça soluções robustas, que permita a implementação em computadores e seja compatível com outras ferramentas de projeto mecânico, a metodologia Ashby.

2.2. Metodologia Ashby

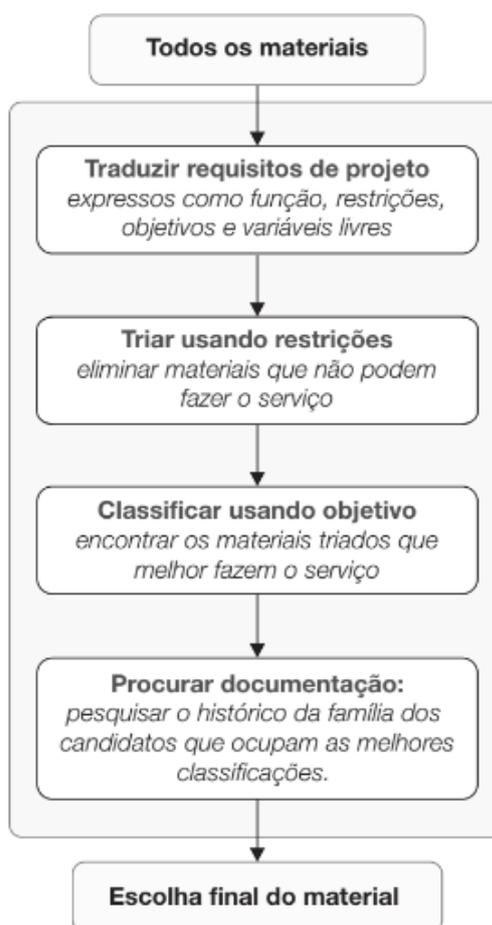
A metodologia Ashby possui um foco sistemático e abrangente que visa orientar projetistas na escolha apropriada de materiais. Ela busca simplificar e principalmente estruturar o processo de seleção, permitindo uma análise eficiente e metódica das características do material sempre comparando com os requisitos do projeto. A metodologia compreende várias etapas, incluindo a tradução das necessidades do projeto em características de materiais relevantes, a triagem de opções viáveis com base em critérios iniciais, avaliação detalhada de alternativas restante e a procura da documentação restante. Ela oferece, como outra vantagem deste método, uma estrutura clara para a documentação das decisões de seleção de materiais, facilitando a comunicação eficaz entre a equipe de projeto e possibilitando melhorias contínuas ao longo do tempo, eliminando assim, o aspecto subjetivo encontrado nas escolhas.

Segundo o autor, essa tarefa pode ser declarada em duas linhas, sendo elas:

1. identificar o perfil de atributos desejado; e então
2. Compará-lo com os materiais de engenharia da realidade e encontrar a melhor solução.

Resumidamente é isso, porém, ao se destrinchar e colocar na prática essa declaração, a seleção de material pode vir a se tornar algo vagaroso, dependendo da aplicação do material e das variáveis que se desejam minimizar ou maximizar. O processo consiste em 4 etapas, tradução, triagem, classificação e por último, a documentação; como mostrado na figura 4 a seguir.

Figura 4: Processo de seleção de material.



Fonte: Ashby, 2012

No início do processo, é importante começar com a lista completa de materiais, para ter certeza que não perca nenhuma oportunidade. Cada material possui suas características próprias, como densidade, condutividade térmica ou elétrica,

resistência mecânica, valor. Cada aspecto do material deve ser levado em conta durante a procura do elemento que melhor serve o projeto.

2.2.1. Tradução

Todo projeto é realizado com o objetivo de atender suas funções da melhor maneira possível, e, durante a escolha de material, o projetista já precisa estar ciente dessas funções, não o bastante, precisará entender completamente os aspectos do projeto para basear sua escolha. Para o autor, qualquer componente de engenharia tem uma ou mais funções: suportar uma carga, conter uma pressão e assim por diante. Além disso, o componente precisa realizar essas funções sujeito a restrições, como uma carga máxima que ele precise suportar, dimensões exatas que ele precisa ter e muito mais. Ademais, ao projetar o componente, ele é feito pensando em atender um objetivo, como ser o mais barato, mais seguro, mais resistente, entre outros. Assim, definimos função, restrição e objetivos, que são as condições de contorno.

Assim, a tradução é definida, pelo autor, como a etapa onde os requisitos do projeto, muitas vezes vagos, são traduzidos em restrições e objetivos que podem ser aplicados no banco de dados de materiais. Ou seja, identifica e descreve as demandas funcionais do projeto e transformá-las em critérios mensuráveis que, junto ao banco de dados de materiais, serão utilizados para comparar diferentes materiais. A imagem 5 a seguir cita as etapas definidas pelo autor.

Figura 5: Processo de tradução na seleção de materiais.

Tabela 5.6 Tradução	
Etapa n°	Ação
1.	Definir os requisitos de projeto: <i>Função:</i> O que componente faz? <i>Restrições:</i> Requisitos essenciais que devem ser cumpridos: por exemplo, rigidez, resistência mecânica, resistência à corrosão, características de conformação etc. <i>Objetivo:</i> O que deve ser maximizado ou minimizado? <i>Variáveis livres:</i> Quais são as variáveis não restringidas do problema?
2.	Fazer uma lista de restrições (não sofrer escoamento, não sofrer fratura, não sofrer flambagem etc.) e desenvolver uma equação para elas, se necessário.
3.	Desenvolver uma equação para o objetivo em termos dos requisitos funcionais, geometria e propriedades de materiais (<i>função objetivo</i>).
4.	Identificar as variáveis livres (não especificadas).
5.	Substituir as variáveis livres das equações de restrição na função objetivo.
6.	Reunir as variáveis em três grupos: requisitos funcionais F , geometria G e propriedades de material M ; assim Métrica de desempenho $P \leq f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$ ou métrica de desempenho $P \leq f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_3(M)$
7.	Ler o índice de material, expresso como uma quantidade M que otimiza a métrica de desempenho P . M é o critério de excelência.

Fonte: Ashby, 2012

2.2.2. Triagem

Como exposto anteriormente, todos os materiais devem ser considerados possíveis candidatos até que se prove o contrário, e é nesta etapa onde os materiais que não são aptos a realizar o serviço serão eliminados do processo. Ela é fundamental para a metodologia, pois tem o objetivo de transformar o enorme banco de dados de materiais em uma lista de possíveis candidatos aptos a realizar a tarefa requerida, facilitando assim a escolha do projetista que terá que escolher um entre eles.

2.2.3. Classificação

Durante o processo anterior, uma lista com todos os materiais disponíveis é filtrada em uma lista com os elementos que cumprem os requisitos necessários para a realização da tarefa. Agora, segundo Ashby (2012), a classificação vem necessariamente para classificar os escolhidos em uma lista ainda menor, tendo como critério o objetivo visado. Ou seja, conhecendo todos os materiais que atendem os requisitos, são escolhidos os que cumprem a finalidade da melhor maneira possível. Por exemplo, na seleção de material de um quadro de bicicleta, que preferivelmente seja leve, entre os materiais filtrados na triagem, os elementos mais leves que cumprem os requisitos serão escolhidos durante a classificação.

O objetivo proposto durante a escolha pode variar de acordo com o projeto e suas finalidades. No exemplo acima, o objetivo era minimizar a massa do projeto,

porém, é comum também observar projetos que têm como objetivo diminuir o custo do projeto, mitigar o impacto ambiental, minimizar o volume.

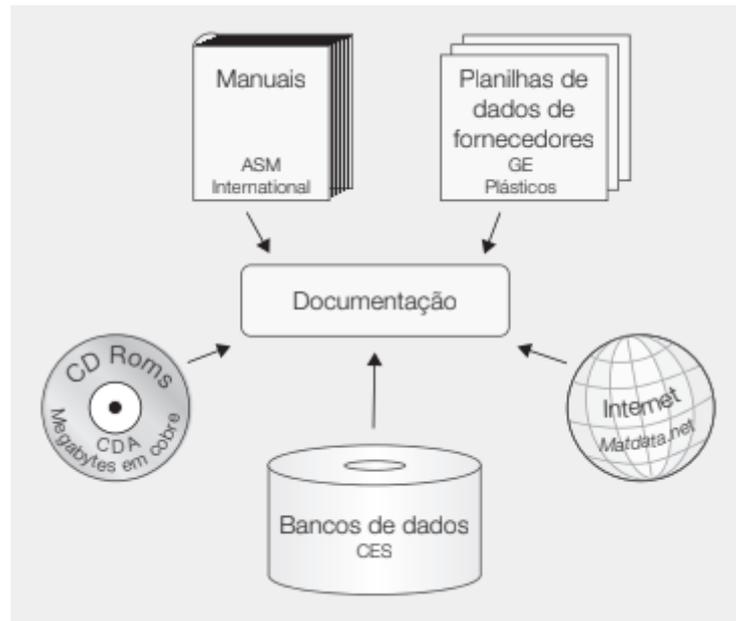
Ashby (2012) comenta que os objetivos definem os índices de material, para os quais procuramos valores extremos. Quando o objetivo não está ligado a uma restrição, o índice do material é apenas uma propriedade do material. Entretanto, quando está relacionado a uma restrição, o índice torna-se um grupo de propriedades.

2.2.4. Documentação

Todos os processos anteriores geram, como resultado, um acervo de materiais filtrados de modo que obedeçam às restrições e ordenados maximizando ou minimizando o objetivo do projeto. Entretanto, segundo Ashby (2012), não se deve selecionar baseando-se apenas nessa lista, a melhor escolha definitiva deve ser feita só após o minucioso estudo da documentação dos candidatos. Ou seja, é importante ter acesso a outras fontes de informação acerca dos elementos sugeridos, como manuais, planilhas de dados de fabricante e fontes armazenadas em computador, estudos de caso etc. A imagem a seguir ilustra bem essas opções.

Essa etapa é importante, pois, é necessária para eliminar vícios ocultos do projeto, descobrir se existem algum motivo que não foi analisado nas etapas anteriores que poderia impedir um correto funcionamento do material no dado projeto. Por exemplo, um projeto que terá contato com água durante seu funcionamento, é importante ver, durante a fase de documentação, se os materiais classificados resistem à corrosão. A figura 6 a seguir nos dá exemplos de documentações.

Figura 6: Fontes de documentação.



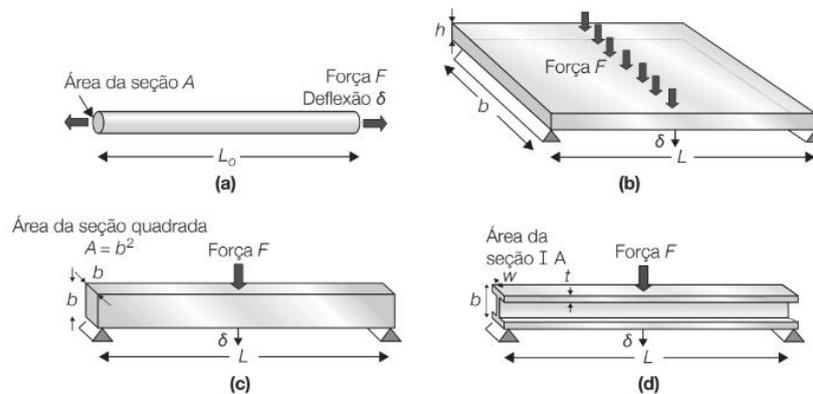
Fonte: Ashby, 2012.

2.3. Índices de material

Como mencionado anteriormente, os objetivos definem os índices de material, para os quais procuramos valores extremos, já as restrições determinam limites de propriedades. Essas propriedades são agrupadas por meio de funções para otimizar os desempenhos dessas propriedades sem que haja extrapolação dos limites indicados pelas restrições.

Componentes mecânicos cumprem requisitos funcionais, ou seja, possuem carregamentos aplicados a eles, que podem ser descritos como uma combinação de tensões, como axial, flexão, torção e compressão, entretanto, normalmente apenas um tipo de tensão domina. Os elementos recebem nomes funcionais de acordo com o carregamento suportado, os tirantes suportam tração, vigas e painéis suportam flexão, eixos suportam torques, colunas suportam compressão axial. Deste modo, o nome dos componentes subentende a função. A figura 7 a seguir ilustra alguns exemplos de componentes mecânicos sob cargas diferentes.

Figura 7: Componentes genéricos e suas cargas.



Fonte: Ashby, 2012

Em termos gerais, para chegar às equações finais dos índices de material, é necessário manipular equações, levando em consideração todas as funções, objetivos e restrições estabelecidos no estágio inicial do projeto. No entanto, antes de realizar essas manipulações, é fundamental ter pleno conhecimento da equação de desempenho P . O primeiro termo dessa equação trata dos requisitos funcionais (F), que se relacionam com a capacidade de atender a determinadas necessidades, como o suporte de cargas. O segundo termo lida com os parâmetros geométricos (G), que envolvem as dimensões físicas do componente. Por fim, o terceiro e último termo se concentra nas propriedades do material (M), também conhecido como índice material. Essa fórmula é representada pela equação (1) a seguir.

$$P = [(Req. Funcionais, F), (Req. geométricos, G), (Propriedades do Material, M)]$$

Ou:

$$P = f(F, G, M) \quad (1)$$

Segundo Ashby (2012), P , o desempenho métrico, descreve alguns aspectos do desempenho do componente, como sua massa, volume, custo ou vida útil. Assim, um projeto ótimo é a seleção do material e geometria que maximizam ou minimizam a função P , dependendo do que se busca no projeto.

Quando a equação 1 têm seus grupos de parâmetros separáveis, ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$P = f_1(F) \cdot f_2(G) \cdot f_2(M) \quad (2)$$

Onde f_1 , f_2 , f_3 são funções separadas, que são simplesmente multiplicadas entre si. Elas usualmente são separadas. Ashby (2012) comenta que, nesses casos, a escolha ótima do material independe dos detalhes do projeto, ou seja, é igual para todas as geometrias, G , e para todos os valores do requisito da função F . Dessa forma, é possível realizar a escolha do subconjunto de materiais sem resolver o problema do projeto inteiro, ou até sem conhecer os detalhes de F e G . Segundo Ashby (2012), isso permite uma enorme simplificação, tendo em vista que o desempenho de todas F e G são maximizados quando maximizamos $f_3(M)$.

Como dito anteriormente, cada combinação de função, objetivo e restrição resulta em um índice de material. Além disso, cada projeto possui sua própria combinação resultando em um índice de material único.

A partir dessa generalização, adotaremos o projeto de um painel leve e rígido, com o objetivo de minimizar massa. Logo em seguida faremos também o projeto de uma viga leve e rígida, também minimizando a massa. Para exemplificar como deduzir a equação do índice de material para cada um desses casos.

Se tratando de uma placa plana, o painel leve e rígido tem seu comprimento L e largura b especificados, mas sua espessura h é livre. A restrição de rigidez exige que a placa não sofra deflexão maior que δ quando carregado sob flexão com uma carga central F .

Segundo Ashby (2012), primeiramente devemos procurar a equação que melhor descreva a quantidade a ser maximizada ou minimizada, nesse caso, a massa m da placa deve ser minimizada:

$$m = A L \rho = b h L \rho \quad (3)$$

Onde A é a área da seção transversal e ρ a densidade do material. Além disso, sua rigidez à flexão S deve ser no mínimo S^* :

$$S = \frac{C_1 E I}{L^3} \geq S^* \quad (4)$$

Sendo C_1 uma constante que depende somente da distribuição das cargas e E o módulo de Young. O momento de segunda ordem de área, I , para uma seção retangular é:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (5)$$

Podemos diminuir a massa reduzindo h , porém somente até o ponto em que a restrição de rigidez ainda é atendida. Usando as equações 3, 4 e 5, e eliminando h na função objetivo, temos:

$$m = \left(\frac{12S^*}{C_1 b}\right)^{1/3} (bL^2) \left(\frac{\rho}{E^{1/3}}\right) \quad (6)$$

Sendo que nessa equação, o primeiro termo entre parênteses é a restrição funcional, o segundo termo é a restrição geométrica e o último termo é a restrição do material. Ou seja, os melhores materiais para um painel leve, rígido são os que tem maiores valores de:

$$M_p = \left(\frac{E^{1/3}}{\rho}\right) \quad (7)$$

Para Ashby (2012), como tratamos com propriedades específicas, é mais comum expressá-lo em uma forma na qual um máximo é procurado. Logo, invertamos os valores do terceiro termo entre parênteses.

Exemplificando agora com uma viga leve e rígida, não deve sofrer deflexão maior que δ , com o objetivo de minimizar massa. Deve-se deduzir a equação de índice de material para esse caso específico. Para iniciar os cálculos, será considerada uma viga simples de seção quadrada, $A = b \times b$, que pode variar de tamanho, mas mantendo a seção quadrada. Possui comprimento fixo L , carregado com uma carga central F . Como queremos que ela seja leve, é necessário minimizar a massa.

Logo, a função objetivo para a massa é:

$$m = A L \rho = b^2 L \rho \quad (8)$$

Rigidez à flexão S deve ser no mínimo S^* :

$$S = \frac{C_2 EI}{L^3} \geq S^* \quad (9)$$

Onde I é o momento de segunda ordem da área para uma viga de seção quadrada e C_2 é uma constante.

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{A^2}{12} \quad (10)$$

Assim, podemos eliminar b ou A da equação 8, obtendo:

$$m = \left(\frac{12S^*L^3}{C_2} \right)^{1/2} (L) \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (11)$$

Logo, os melhores materiais para uma viga rígida e leve, independente da geometria, são os que possuem maiores valores para o índice M_v , onde:

$$M_v = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (12)$$

Caso o foco seja minimizar o custo do projeto, os índices mudam novamente. Sendo o valor do material, C_m , $\$/Kg$, o custo total para o projeto de massa m é exatamente mC_m . Assim, a função objetivo para o custo do material C do painel ou da viga torna-se:

$$C = mC_m = ALC_m\rho \quad (13)$$

Dessa forma, substituindo as equações 7 e 12 na 13, teremos as seguintes equações para vigas e painéis respectivamente:

$$C_v = \frac{E^{1/2}}{C_m\rho} \quad (14)$$

$$C_p = \frac{E^{1/3}}{C_m\rho} \quad (15)$$

Como pôde ser confirmado, cada projeto desenvolve seus próprios índices de material, cada um com suas peculiaridades de acordo com seus objetivos e restrições. A imagem 8 a seguir exemplifica a variedade de possíveis índices de materiais de acordo com algumas funções:

Figura 8: Exemplos de índices de material

Função, objetivo e restrições	Índice
<i>Tirante</i> , peso mínimo, rigidez prescrita	$\frac{E}{\rho}$
<i>Viga</i> , peso mínimo, rigidez prescrita	$\frac{E^{1/2}}{\rho}$
<i>Viga</i> , peso mínimo, resistência prescrita	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{\rho}$
<i>Viga</i> , custo mínimo, rigidez prescrita	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
<i>Viga</i> , custo mínimo, resistência prescrita	$\frac{\sigma_y^{2/3}}{C_m \rho}$
<i>Coluna</i> , custo mínimo, carga de flambagem prescrita	$\frac{E^{1/2}}{C_m \rho}$
<i>Mola</i> , peso mínimo para armazenamento de energia dado	$\frac{\sigma_y^2}{E \rho}$
<i>Isolamento térmico</i> , custo mínimo, fluxo de calor prescrita	$\frac{1}{\lambda C_p \rho}$
<i>Eletromagneto</i> , campo máximo, elevação de temperatura prescrita	$\frac{C_p \rho}{\rho_e}$

ρ = densidade; E = módulo de Young; σ_y = limite elástico; C_m = custo/kg; λ = condutividade térmica; ρ_e = resistividade elétrica; C_p = calor específico

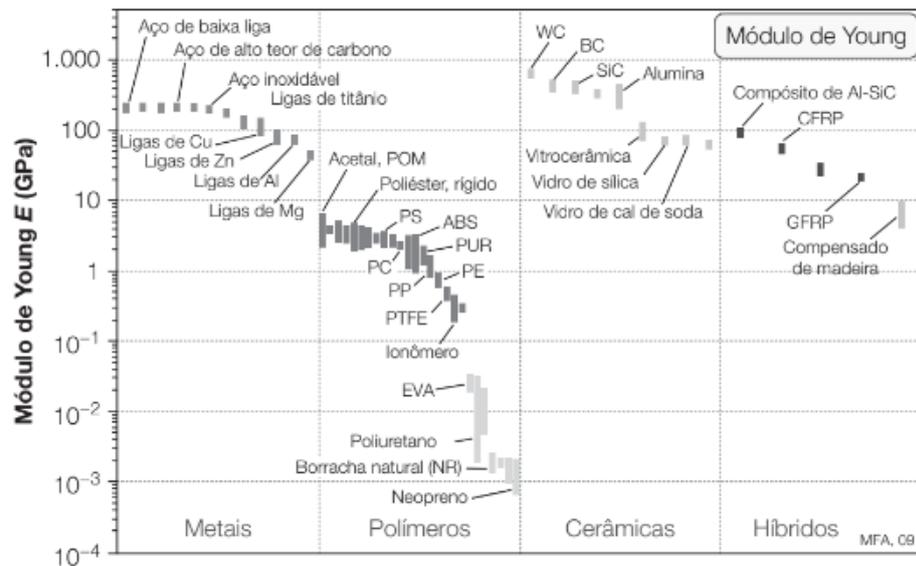
Fonte: Ashby, 2012

2.4. Diagramas de propriedade de materiais

Ashby (2012) propõe a utilização de diagramas de propriedades de materiais como uma ferramenta fundamental na seleção de materiais para projetos mecânicos. Esses diagramas representam graficamente diversas propriedades dos materiais, como resistência, densidade, módulo de elasticidade, resistência à tração e muitas outras, em uma forma visualmente acessível. Eles desempenham um papel crucial na seleção de materiais porque permitem aos engenheiros e projetistas compararem as características de diferentes materiais de forma rápida e eficiente. Essa compreensão visual das propriedades dos materiais ajuda a tomar decisões informadas durante o processo de projeto, garantindo que o material escolhido atenda aos requisitos específicos de desempenho e funcionalidade do produto final.

Logo, o autor utiliza duas variações de gráficos para auxiliar na escolha do material, sendo eles o diagrama de balões e o diagrama de barras. A primeira, representada pela figura 9 a seguir, é uma representação gráfica de uma determinada propriedade em um eixo, as famílias das propriedades em outro eixo, além disso, é comumente representado em uma escala logarítmica. Cada barra mostra a faixa de módulo oferecida por um material, alguns dos quais são identificados.

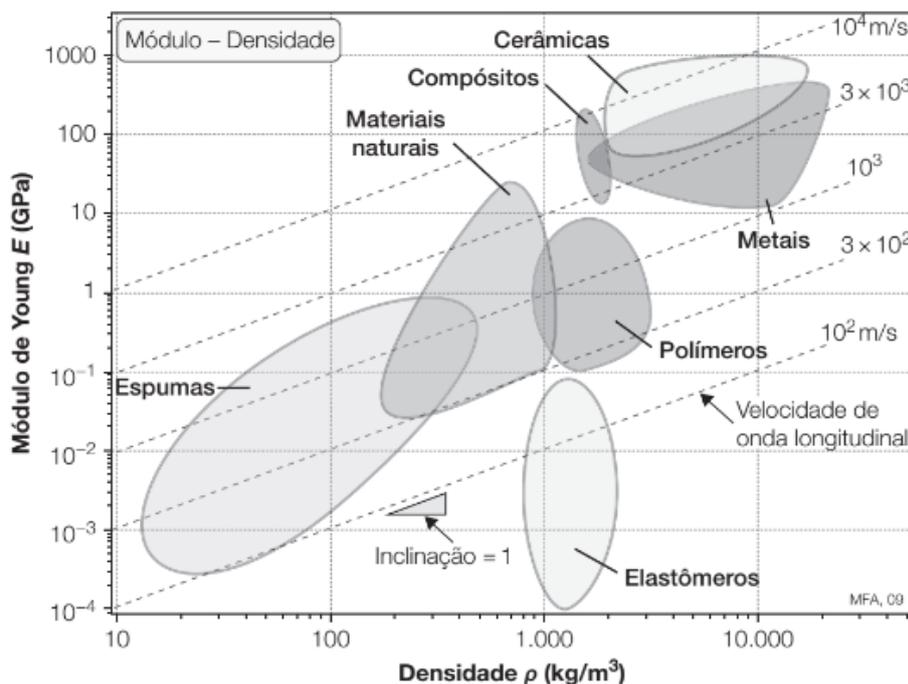
Figura 9: Diagrama de barras de Módulo de Young para alguns materiais.



Fonte: Ashby, 2012

Já a segunda é a representação de duas propriedades em eixos diferentes, as famílias de materiais ficam expostas em balões e as linhas tracejadas presentes no gráfico auxiliam a escolha do material, como demonstrado na figura 10 a seguir. Esse tipo de gráfico facilita a interpretação pois possibilita a visualização do comportamento de várias famílias de materiais quando relacionamos duas propriedades relacionadas. É o principal facilitador da escolha dos materiais.

Figura 10: gráfico de módulo de Young X densidade



Fonte: Ashby, 2012

3. METODOLOGIA

O método empregado na elaboração deste estudo de caso foi voltado para uma abordagem investigativa e descritiva, visando a exploração ampla do tema em questão. Para realizar a seleção de material do carrinho de rolimã, será utilizada a metodologia descrita na fundamentação teórica deste trabalho. Assim, será feita uma comparação entre os materiais já utilizados atualmente e os materiais selecionados através da metodologia proposta. Essa comparação tem como objetivo determinar as melhores opções para o objetivo do projeto, sendo ele a redução de massa, enquanto respeitam as restrições do projeto.

Tendo em vista a gama de modelos de veículos de rolimã existentes, será feita a seleção de material para um carrinho específico. Ele deve ser feito de madeira pinus, deve ser simples, com rolamentos sem encapamento de borracha e não deve possuir freios. Basicamente, deve ser composto apenas da placa central, por um par de vigas sustentando a placa e pelos rolamentos. Assim, pode-se obter o módulo de Young mínimo para tal aplicação, e, com isso, poderemos triar materiais que não respeitem esse requisito.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, foi utilizada da metodologia Ashby para selecionar e comparar os materiais já utilizados em um carrinho de rolimã. Para uma melhor análise, o carrinho será dividido em três partes, a placa central e as duas vigas na extremidade. Como mencionado anteriormente, as vigas e a placa sofrerão um carregamento de flexão, a análise será feita com duas restrições, rigidez e custo, e com o objetivo de diminuição de massa para todas as peças.

4.1. Placa central

4.1.1. Tradução

Durante a fundamentação teórica, foi demonstrado que a primeira etapa da metodologia é a tradução, onde as requisições do projeto são escritas em forma de parâmetros. Como mencionado anteriormente, esse processo visa, facilitar a visualização dos requisitos subjetivos. No caso da placa central, os requisitos serão expressos no quadro 1 a seguir.

Quadro 1: Quadro de requisitos da placa central.

Placa central
Função: Suportar o peso do passageiro
Restrição: Rigidez e Custo
Objetivos: Minimizar massa
Variável livre: Escolha do material, Espessura da placa

Fonte: Autor

Com a função bem especificada, é necessário lembrar que a placa central funciona como um painel. O painel é carregado com o peso do passageiro no centro da placa durante as descidas, ou seja, essa força gera um momento, e o carregamento dominante é de flexão. É necessário reforçar que, para o funcionamento ideal do carrinho, essa peça central deve ter uma boa rigidez, pois a peça não deve flexionar e tocar no chão. Caso isso aconteça, tanto a segurança do passageiro quanto a eficiência do brinquedo estarão comprometidos, pois a placa tocará o chão durante a

descida, freando o carro e danificando a placa, possibilitando a ruptura da placa e lesão do passageiro.

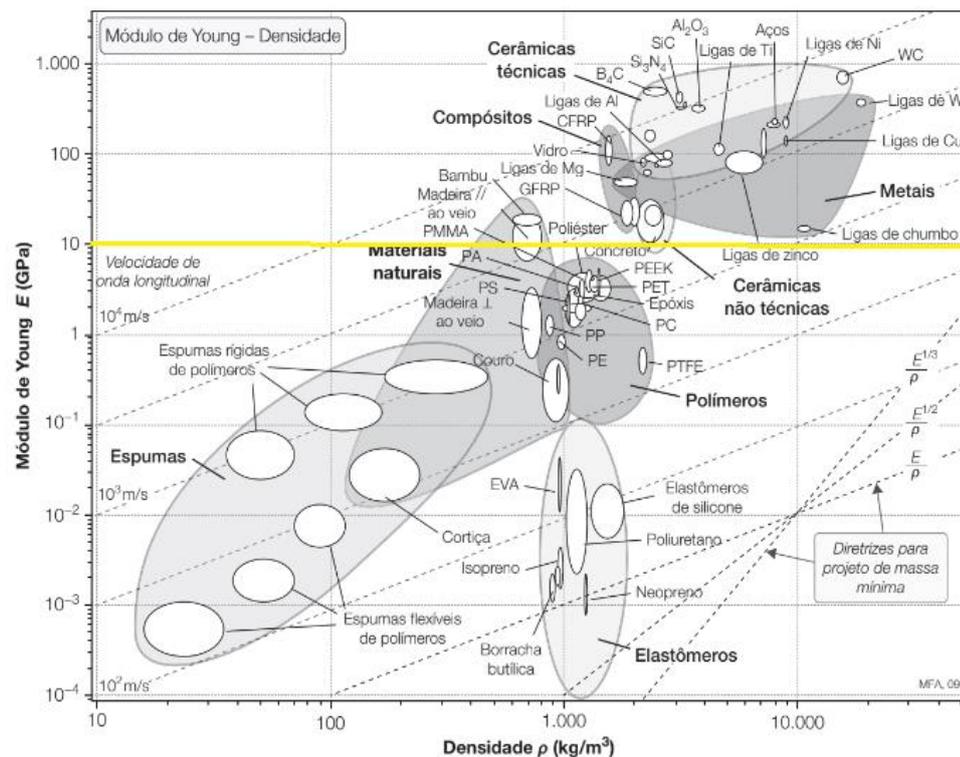
4.1.2. Triagem

As variáveis livres, definidas pelo projeto, serão a espessura da placa e a escolha do material. Assim, uma menor placa resulta em um menor volume e custo. E a escolha do material nos permite selecionar os materiais mais baratos que satisfaçam as restrições do projeto.

Como mencionado anteriormente, na triagem, Ashby (2012) nos informa que os materiais sejam triados usando as restrições predefinidas. Por falta de dados utilizados na produção de carrinhos de rolimã, serão utilizados os materiais já utilizados como parâmetro, com isso, utilizaremos madeira pinus como referência. De acordo com o banco de dados online, o MatWeb, o módulo de Young de uma madeira pinus pode variar por diversos fatores, e seu valores variam, aproximadamente entre 8 GPA até 12 GPA. Será adotado 10 GPA como valor de referência para o estudo.

Com esse valor, pode-se plotar uma linha no gráfico de Módulo de Young em relação à densidade. Essa linha vai servir como a primeira triagem, onde todos os valores abaixo da linha serão excluídos da seleção, como mostrado na figura 11:

Figura 11: Gráfico do módulo de Young x Densidade



A partir desse gráfico, podemos excluir totalmente da seleção as famílias de 3 materiais, sendo eles: os Polímeros, as Espumas e os Elastômeros. Todas essas famílias ficaram abaixo da linha amarela, ou seja, seus materiais não possuem o valor limitante de rigidez mínimo para serem possíveis concorrentes à seleção.

4.1.3. Classificação

Logo, com a eliminação dos materiais que não satisfazem o projeto, podemos classificar os materiais restantes, os que ficaram acima da linha. Será de extrema importância, nessa etapa, desenvolver as equações de desempenho, definindo o índice de material.

Para isso, como mencionado anteriormente, devemos procurar a equação que melhor descreva a quantidade a ser minimizada. No caso descrito, é desejável minimizar a massa m do projeto. Assim, deve-se usar a equação (3).

$$m = AL\rho = bhL\rho \quad (16)$$

Onde A é a área da seção transversal, L é o comprimento e ρ é a densidade do material. Sua rigidez à flexão S deve ser no mínimo S^* , como na equação (4).

$$S = \frac{C_1 E I}{L^3} \geq S^* \quad (17)$$

Sendo C_1 a constante que depende somente da distribuição das cargas e E o módulo de Young. O momento da segunda ordem de área, I , para uma seção retangular, como mencionado anteriormente na equação (5), é:

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (18)$$

Para obtermos a equação (6), demonstrada anteriormente, diminuimos a massa m se reduzirmos a altura h , porém apenas até o ponto em que a restrição de rigidez ainda é atendida. Usando as equações anteriores e eliminando h da função objetivo, temos:

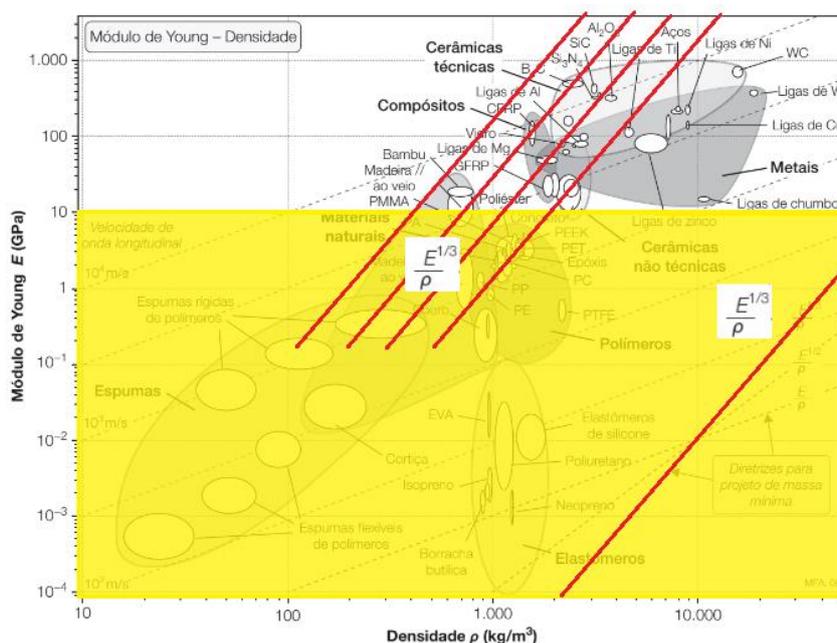
$$m = \left(\frac{12S^*}{C_1 b} \right)^{1/3} (bL^2) \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \quad (19)$$

Sendo que, nessa equação, como mencionado anteriormente, cada termo entre parênteses representa uma restrição. O Primeiro termo é a restrição funcional, o segundo é a restrição geométrica e o último termo é a restrição do material. Então, os melhores materiais para um painel leve e rígido, são os que tem maiores valores expressos pela equação (7):

$$M_p = \left(\frac{E^{1/3}}{\rho} \right) \quad (20)$$

Onde M_p é o índice do material para o painel. Para Ashby (2012), é mais comum expressar de uma forma na qual o máximo é procurado. Por isso os valores do terceiro termo são invertidos.

A partir do índice, devemos utilizar novamente o diagrama Módulo de Young em relação à Densidade para selecionarmos os melhores candidatos da seleção do material. Ashby (2012) diz para utilizarmos a linha de diretriz do projeto, respeitando o índice encontrado na equação de desempenho. Também sugere que, quanto mais deslocarmos essa linha a esquerda, mais maximizado será o objetivo. Com isso, podemos diminuir o número de candidatos, escolhendo um enxuto grupo de possíveis materiais a serem estudados na fase de documentação. Assim, temos a figura 12 para representar essa etapa.

Figura 12: Gráfico E em relação a ρ demarcado pelo Índice de material

Fonte: Ashby (Adaptado), 2012.

Com esse gráfico, algumas classes de materiais podem ser visivelmente selecionadas para a etapa de documentação e colocados na tabela 1 a seguir, são eles:

Tabela 1: Materiais classificados para a documentação.

FAMÍLIA	CLASSE	CLASSIFICAÇÃO
MATERIAIS NATURAIS	BAMBU	1º
MATERIAIS NATURAIS	MADEIRA // AO VEIO	2º
COMPÓSITOS	CFRP	3º
CERÂMICAS TÉCNICAS	B ₄ C	4º
METAIS	LIGAS DE Mg	5º

Fonte: Autor

Com isso, nossa seleção se encontra reduzida entre esses 5 possíveis candidatos. O que determinará qual o melhor candidato será a avaliação da documentação de cada material aplicado no contexto do projeto, como o histórico de

utilização do material, custo do material, disponibilidade do material, fornecedores, conformação etc.

4.1.4. Documentação

Com isso, podemos encontrar a documentação desses materiais por toda a internet e colocá-las no quadro 2 seguinte:

Quadro 2: Documentação de materiais placa central.

MATERIAL	DOCUMENTAÇÃO
BAMBU	<p>Bambu é um material renovável de crescimento acelerado, o tronco do bambu é oco e possui uma superfície exterior dura e durável. A sua estrutura tubular natural proporciona-lhe uma excelente rigidez à flexão e resistência com baixo peso. Entretanto, sua resistência à radiação UV, umidade e fogo são baixas. Porém, a sua resistência à umidade e dissipação de vibração é melhor quando comparada à de madeiras.</p> <p>É bastante utilizado na construção civil, em varas de pescas, papel, flechas, skates etc.</p>
MADEIRA // AO VEIO	<p>Materiais naturais, como a madeira, possuem propriedades com valores que variam muito mais do que materiais feitos pelo homem, como o metal, pois possuem grãos mais heterogêneos. Por cada unidade de peso, a madeira é barata, renovável, firme, resistente e robusta, de fácil manipulação. Pode ser moldada em formas complexas quando laminada.</p> <p>Umidade pode afetar as propriedades e suas propriedades são anisotrópicas.</p>

	<p>Madeira é bastante utilizada na construção civil, como revestimento do chão, escadas, móveis, esculturas, portas etc.</p>
CFRP	<p>Carbon fiber reinforced polymer(CFRP), ou polímero reforçado por fibra de carbono, oferece ótima dureza e força, mas muito mais caro que outros materiais. A fibra de carbono fica responsável pelas cargas mecânicas, enquanto a matriz, normalmente de epóxi ou poliéster, fica responsável em transmitir as cargas para as fibras, promovendo ductibilidade e resistência, além de proteger as fibras de danos causados pelo ambiente ou pelo manuseio.</p> <p>Entretanto, as propriedades variam de acordo com a fibra de carbono e a matriz utilizadas. Elas também podem variar de acordo com as condições do ambiente utilizado, como umidade, calor, carga de fadiga.</p> <p>Bastante utilizado em peças leves de aeronaves, carros, barcos. Também é utilizada na produção de raquetes, tacos de golfe, molas, vasos de pressão etc.</p>
B ₄ C	<p>O Carbetto de Boro é um material cerâmico composto principalmente por boro e carbono. Ele, apesar de leve, possui uma dureza excepcional, quase tão duro quanto o diamante; ótima resistência ao desgaste e às altas temperaturas; além de possuir uma boa condutividade térmica. Outra propriedade do carbetto de boro é o fato dele absorver nêutrons, podendo ser utilizado como escudo nuclear.</p>

	<p>Bastante utilizado como colete a prova de bala, blindagem veicular, peças de ferramentas de precisão etc.</p>
LIGAS DE Mg	<p>As ligas de magnésio são compostas principalmente por magnésio com adição de outros elementos, como alumínio, zinco, manganês e cálcio, para melhorar suas propriedades mecânicas e processamento.</p> <p>As ligas são bastante leves, aproximadamente 30% mais leve que o alumínio, possuem uma boa relação resistência-peso, boa capacidade de amortecimento de vibrações, alta condutividade térmica e elétrica. Embora o magnésio puro seja suscetível à corrosão, as ligas dele são produzidas com adições de elementos visando melhorar sua resistência à corrosão.</p> <p>Bastante utilizado na indústria aeroespacial e automotiva, galões de combustível nuclear, equipamentos eletrônicos etc.</p>

Com isso, é possível observar que todos os materiais seriam boas opções para o projeto, cada um com suas peculiaridades. Porém, seus usos são sugeridos para ocasiões diferentes. Os três últimos materiais são demasiadamente caros para aplicação, que requer um custo menor, por se tratar de um brinquedo familiar. Com isso, o bambu e a madeira são os mais indicados para escolha.

Entre os dois finalistas, o mais recomendado é o bambu. Essa escolha se deve ao fato do bambu ter uma melhor capacidade de dissipar vibrações e uma melhor resistência à umidade quando comparada à madeira // ao veio. Como mencionado na documentação, esse material já é bastante utilizado na produção de pranchas de

skate, assim, a utilização dele para um carrinho de rolimã, que possui, uma função similar, é muito indicada.

4.2. Vigas

4.2.1. Tradução

Repetindo o processo para as vigas, obtemos a seguinte tradução representada pelo quadro 3:

Quadro 3: Requisitos para as vigas.

Viga
Função: Suportar o peso da placa central
Restrição: Rigidez e Custo
Objetivos: Minimizar massa
Variável livre: Escolha do material, Espessura da placa

Fonte: Autor

Com as funções bem definidas, nota-se que as vigas têm a função de erguer o painel central e servir de apoio e direcionar as rodas frontais, sem flexionar para que a peça não arraste no chão. Com isso, é válido afirmar que elas sofrem um carregamento de flexão.

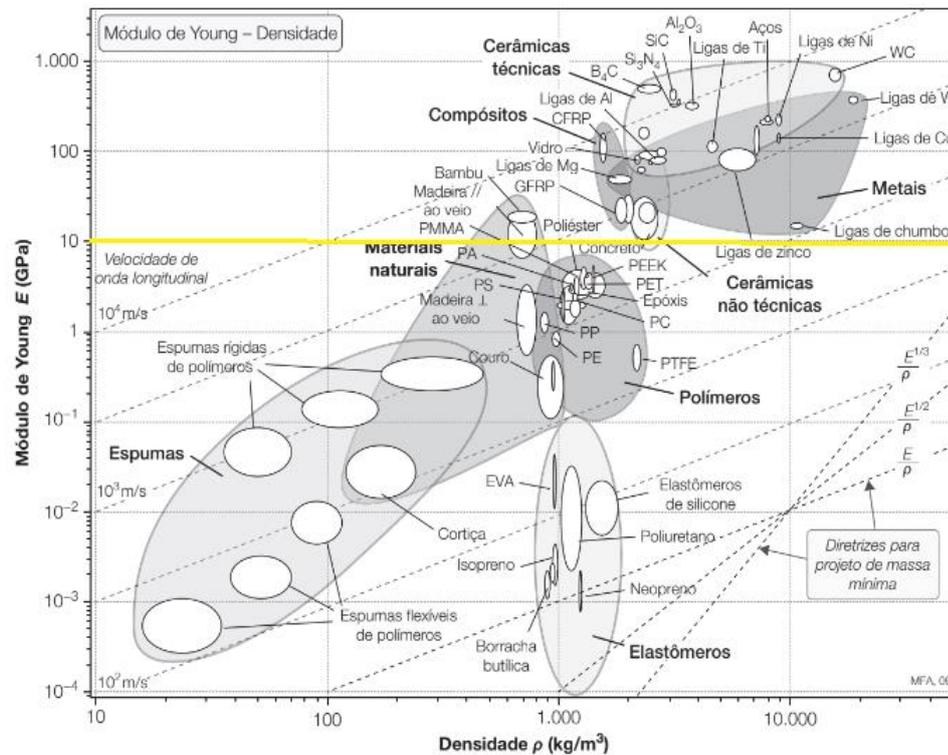
Como na placa central, as variáveis livres corroboram com o objetivo escolhido. Com a definição de uma espessura menor, menos material será utilizado e consequentemente menor será o gasto. Assim como a escolha do material nos permite escolher opções mais baratas ou mais leves.

4.2.2. Triagem

Nessa etapa, como feito no caso da placa central, todos os materiais serão inicialmente aceitos e posteriormente triados utilizando as restrições impostas. Como no caso anterior, a falta de informação acerca a fabricação de carrinhos de rolimã, serão utilizados os parâmetros dos materiais já comumente utilizados para definir o Módulo de Young limitante. Logo, assim como na placa central, será utilizado o valor de 10 GPa. Esse valor foi escolhido utilizando as mesmas imposições que a placa central.

Então faremos a primeira triagem plotando a linha no gráfico Módulo de Young por densidade, eliminando os materiais que ficarem abaixo dela. Assim, obtemos a figura 11:

Figura 11: Gráfico do módulo de Young X Densidade



Fonte: Ashby (Adaptado), 2012.

Com esse gráfico, vemos que muitos materiais são eliminados por ficarem abaixo da linha amarela. Assim como no caso da placa central, nota-se que 3 famílias foram completamente eliminadas, a família das espumas, dos elastômeros e dos polímeros, pois todas possuem valores de Módulo de Young menores que os especificados para o projeto.

4.2.3. Classificação

Após a primeira triagem, vem novamente a etapa da classificação. Portanto, após remover os materiais que não atendem aos requisitos do projeto, podemos categorizar os materiais restantes, aqueles que superaram o critério estabelecido. Nesta fase, é crucial formular as equações de desempenho para determinar o índice de material.

Para isso, como mencionado anteriormente, é necessário encontrar a equação que melhor representa a variável a ser minimizada. No exemplo dado, o objetivo é reduzir a massa m do projeto. Assim, deve-se utilizar a equação apropriada.

Nesse caso, utilizaremos a equação (8), que representa a função objetivo para uma viga simples de seção quadrada $A = b \times b$, que pode variar de tamanho, mas mantendo a seção quadrada. Comprimento fixo, carregado com uma carga central F .

$$m = A L \rho = b^2 L \rho \quad (21)$$

A é a área da seção transversal, L é o comprimento e ρ é a densidade do material. Sua rigidez à flexão (S), que deve ser no mínimo S^* , é dada pela equação (9).

$$S = \frac{C_2 EI}{L^3} \geq S^* \quad (22)$$

Sendo C_1 a constante que depende somente da distribuição das cargas e E como módulo de Young. O momento de inércia de segunda ordem, I , para uma seção quadrada, conforme mencionado anteriormente na equação (10), é:

$$I = \frac{b^4}{12} = \frac{A^2}{12} \quad (23)$$

Substituindo b ou A da equação anterior por ρ , chegamos à equação (11), como demonstrado durante a fundamentação teórica:

$$m = \left(\frac{12S^*L^3}{C_2} \right)^{1/2} (L) \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (24)$$

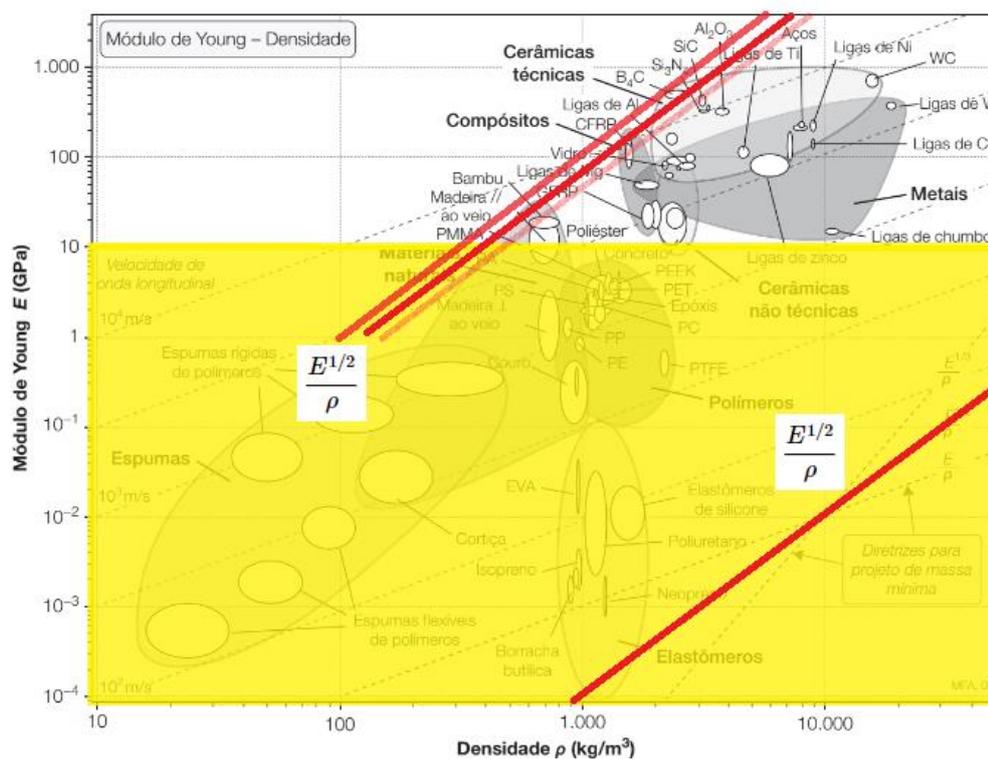
A partir dessa equação, podemos definir que os melhores materiais para uma viga rígida e leve, independente da geometria, são os que possuem maiores valores para o índice M_v da equação (12):

$$M_v = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (25)$$

Onde M_v é o índice do material para a viga. Segundo Ashby (2012), é mais usual expressar de uma maneira que busca o valor máximo. Portanto, os valores do terceiro termo são invertidos. Além disso, esse valor nos indicará a inclinação das linhas que serão traçadas no gráfico para a escolha acurada do material.

Com base no índice, é necessário usar novamente o diagrama que relaciona o Módulo de Young com a Densidade para identificar os melhores candidatos na seleção de materiais. Ashby (2012) recomenda seguir a linha guia do projeto, respeitando o índice obtido na equação de desempenho. Ele também sugere que, quanto mais deslocarmos essa linha para a esquerda, mais otimizado será o objetivo. Dessa forma, podemos reduzir o número de candidatos, selecionando um grupo mais restrito de possíveis materiais para serem estudados na fase de documentação. Temos uma representação da classificação na figura 12:

Figura 12: Gráfico de E em relação à ρ , com os índices de materiais.



Fonte: Ashby (Adaptado), 2012.

Assim, com esse gráfico, podemos selecionar algumas classes de materiais para a fase de documentação. Mesmo com processos parecidos, a classificação dos materiais da viga terá uma ordem de material diferente, pois o ângulo da reta dada

pela equação do índice do material. Obtendo assim a tabela 2 de materiais classificados:

Tabela 2: Materiais classificados para a documentação.

FAMÍLIA	CLASSE	CLASSIFICAÇÃO
CERÂMICAS TÉCNICAS	CARBETO DE BORO (B ₄ C)	1°
COMPÓSITOS	CFRP	2°
MATERIAIS NATURAIS	BAMBU	3°
MATERIAIS NATURAIS	MADEIRA // AO VEIO	4°
CERÂMICAS TÉCNICAS	CARBETO DE SILÍCIO (SiC)	5°

Fonte: Autor

Dessa forma, nossa escolha agora está limitada a esses 5 possíveis candidatos. A decisão sobre qual deles é o mais adequado será baseada na análise da documentação de cada material no contexto do projeto, considerando fatores como histórico de uso, custo, disponibilidade, fornecedores, conformabilidade etc. Podemos perceber que a além da ordem dos materiais ter sido alterada, ligas de alumínio foi substituída por carbetos de silício na 5ª posição da tabela.

4.3. Documentação

Como a maioria dos materiais classificados já estavam presentes na documentação do painel, utilizaremos as informações já apresentadas para auxiliar na escolha. E o restante pode ser obtido na internet, temos então o quadro 4:

Quadro 4: Documentação dos materiais das vigas.

MATERIAL	DOCUMENTAÇÃO

BAMBU	<p>Bambu é um material renovável de crescimento acelerado, o tronco do bamboo é oco e possui uma superfície exterior dura e durável. A sua estrutura tubular natural proporciona-lhe uma excelente rigidez à flexão e resistência com baixo peso. Entretanto, suas resistências à radiação UV, umidade e fogo são baixas. Porém, a sua resistência à umidade e dissipação de vibração é melhor quando comparada à de madeiras.</p> <p>É bastante utilizado na construção civil, em varas de pescas, papel, flechas, skates etc.</p>
MADEIRA // AO VEIO	<p>Materiais naturais, como a madeira, possuem propriedades com valores que variam muito mais do que materiais feitos pelo homem, como o metal, pois possuem grãos mais heterogêneos. Por cada unidade de peso, a madeira é barata, renovável, firme, resistente e robusta, de fácil manipulação. Pode ser moldada em formas complexas quando laminada.</p> <p>Umidade pode afetar as propriedades e suas propriedades são anisotrópicas.</p> <p>Madeira é bastante utilizada na construção civil, como revestimento do chão, escadas, móveis, esculturas, portas etc.</p>
	<p>Carbon Fiber Reinforced Polymer(CFRP), ou polímero reforçado por fibra de carbono, oferece ótima dureza e força, mas muito mais caro que outros materiais. A fibra de carbono fica responsável pelas cargas mecânicas, enquanto a matriz,</p>

CFRP	<p>normalmente de epóxi ou poliéster, fica responsável em transmitir as cargas para as fibras, promovendo ductibilidade e resistência, além de proteger as fibras de danos causados pelo ambiente ou pelo manuseio.</p> <p>Entretanto, as propriedades variam de acordo com a fibra de carbono e a matriz utilizadas. Elas também podem variar de acordo com as condições do ambiente utilizado, como umidade, calor, carga de fadiga.</p> <p>Bastante utilizado em peças leves de aeronaves, carros, barcos. Também é utilizada na produção de raquetes, tacos de golfe, molas, vasos de pressão etc.</p>
B ₄ C	<p>O Carbetto de Boro é um material cerâmico composto principalmente por boro e carbono. Ele, apesar de leve, possui uma dureza excepcional, quase tão duro quanto o diamante; ótima resistência ao desgaste e às altas temperaturas; além de possuir uma boa condutividade térmica. Outra propriedade do carbetto de boro é o fato dele absorver nêutrons, podendo ser utilizado como escudo nuclear.</p> <p>Bastante utilizado como colete à prova de bala, blindagem veicular, peças de ferramentas de precisão etc.</p>
	<p>O carbetto de Silício é um composto de silício e carbono. Possui uma dureza elevada e uma excelente resistência ao desgaste, mesmo tendo uma densidade próxima à do alumínio.</p> <p>Ele, assim como o carbetto de boro, é caro. Ambos possuem um preço alto, custo esse que reflete suas características excepcionais.</p>

CARBETO DE SILÍCIO (SiC)	Bastante utilizado em ferramentas de corte, como lixas de corte e brocas. Muito utilizado também em revestimento de válvulas e bombas e outros maquinários que operam em ambiente de desgaste intenso.
--------------------------	--

Fonte: Autor

Dessa forma, pode-se perceber que todos os materiais analisados, assim como no caso da placa plana anterior, seriam adequados para o projeto, cada qual com suas características específicas. No entanto, seus usos são mais apropriados para situações distintas. Os três últimos materiais documentados, o CFRP, o B4C e o SiC são excessivamente caros para uma aplicação que exige baixo custo, considerando que se trata de um brinquedo familiar. Por isso, o bambu e a madeira se destacam como as opções mais viáveis.

Entre esses dois finalistas, o bambu é o mais recomendado. Essa escolha se deve à sua superior capacidade de dissipar vibrações e maior resistência à umidade em comparação com a madeira. Conforme mencionado na documentação, o bambu já é amplamente utilizado na fabricação de pranchas de skate, o que torna sua aplicação em um carrinho de rolimã, que tem uma função semelhante, altamente apropriada.

4.4. Análise Geral

Embora os resultados da documentação já estejam assegurados, é possível avaliar alguns aspectos importantes nesta seleção de materiais. O painel e as vigas apresentaram candidatos bastante semelhantes. Apesar da alteração na inclinação do índice de material, a lista permaneceu quase inalterada. Apenas elementos como o SiC e as ligas de Magnésio apareceram exclusivamente em apenas uma das documentações, caso o escopo da classificação fosse aumentado, provavelmente eles apareceriam nas listas das outras partes do projeto.

Mesmo que a seleção indique a utilização de um material específico, nada exclui a possibilidade de construir o projeto com outros materiais e documentar como aquele material atua nessa aplicação. É comum ver carrinhos de rolimã de madeira reaproveitada de obra, compensado naval, plástico e até de fibra de carbono, nos casos mais profissionais. Pensando nisso, o bambu pode vir a ser um bom substituto

para os carrinhos, pois, um dos desgastes presentes na atividade é puxar um carro pesado ladeira acima.

Um ponto que pode ser analisado, dentro da perspectiva da metodologia Ashby, é a utilização de materiais como o Carbetto de Boro, Carbetto de Silício e ligas de Magnésio. Materiais que possuem uma utilização totalmente diferente da proposta, mas que talvez tenham alguma utilidade caso sejam utilizados nesse projeto. O que normalmente dificulta essa utilização é o custo de produção desses materiais, e, talvez, seus pesos acabem dificultando a utilização do projeto final.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho de conclusão de curso teve como objetivo utilizar a metodologia Ashby na seleção de materiais de um carrinho de rolimã. Tanto o painel central, quanto as vigas, tinham a redução de massa como objetivo principal. Além disso, durante a documentação, outro critério adotado para a seleção foi o de reduzir custos de produção, pois se tratava de um brinquedo familiar. Assim, primeiramente, nenhum material foi descartado, e, depois de triados e classificados, o material que sobressaiu dos demais foi o Bambu. Ele é um material renovável, de crescimento acelerado, com excelente rigidez à flexão, custo relativamente pequeno, que já é bastante selecionado em projetos utilizados ao ar livre, como skates, varas de pescas e flechas.

Alguns pontos fracos do Bambu são suas baixas resistências à radiação UV, à umidade e ao fogo. Entretanto, sua dissipação de vibração é melhor quando comparada às madeiras normais e suas resistências podem ser aprimoradas com a utilização de óleos, selantes, vernizes, preservativos, tintas, tratamentos térmicos e químicos entre outros, pode-se até combinar alguns tratamentos para proporcionar uma melhor proteção.

Apesar de não ter sido possível utilizar o software sugerido por Ashby, é certo que o resultado obtido ainda foi satisfatório, pois, como mencionado anteriormente, o material selecionado já é amplamente utilizado em projetos similares, como os de shapes de skates. Também, com o uso dos gráficos, diagramas e índices presentes no livro de seleção de materiais do Ashby, é possível perceber que a escolha de

material é bem justificada. Além do mais, podemos perceber as famílias de materiais que seriam mais adequados ao projeto caso não houvesse limite financeiro para a escolha do material, como os compósitos e as cerâmicas técnicas. Assim, podemos concluir que, para um projeto acadêmico onde o objetivo é o estudo e a aplicação da metodologia Ashby, o trabalho cumpre seu papel.

BIBLIOGRAFIA

ALÔ BEBÊ. Conheça a história de brincadeiras e brinquedos antigos. Disponível em: dte.alobebe.com.br/revista/conheca-a-historia-de-brincadeiras-e-brinquedos-antigos.html. Acesso em: outubro/2023.

ASHBY, Michael. Seleção de Materiais no Projeto Mecânico. 4ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

CASTELLUCCI, Thyago M. O. Seleção de Materiais para Skate. Trabalho de conclusão de curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

DEMARTINI, Felipe. Quatro tecnologias da Fórmula 1 que estão mudando seu cotidiano. Disponível em: arquivo.canaltech.com.br/curiosidades/quatro-tecnologias-da-formula-1-que-estao-mudando-seu-cotidiano-45337/. Acesso em: outubro/2023.

DE SOUZA, Thiago A. Utilização da Metodologia Ashby no Projeto UFPBAJA para a Seleção de Materiais. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2020.

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. SMM0333 – Seleção de materiais para projeto mecânico. Disponível em: edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5599977/mod_resource/content/1/SMM0333%20-%20SELEÇÃO%20-%20Aula%201.pdf. Acesso em: outubro/2023.

FACULDADE CAMPO REAL. Regulamento 3ª corrida de carrinhos de rolimã Campo Real. Disponível em: guarapuava.camporeal.edu.br/content/uploads/2018/01/Corrida-de-Rolima-regulamento-2018-Campo-Real.pdf. Acesso em: outubro/2023.

HANSCOM, Angela; LOUV, Richard. Balanced and Barefoot: How Unrestricted Outdoor Play Makes for Strong, Confident, and Capable Children. Maio/2016.

HURLEY, Katie. The Happy Kid Handbook: How to Raise Joyful Children in a Stressful World. Outubro/2015.

KNIGHT, Sara. Outdoor Play and Learning: Policy and Practice. International Journal of Education Policy and Leadership. Dezembro/2011.

MOTOROLA. 5 tecnologias que mudaram o esporte nos últimos anos. Disponível em: hellomoto.com.br/5-tecnologias-que-mudaram-o-esporte-nos-ultimos-anos-ms/. Acesso em: outubro/2023.

NETLELAND, Laamarall. O carrinho de “rolimã” e a evolução... Disponível em: netleland.net/cultura_lazer/o-carrinho-de-rolima-e-a-evolucao.html. Acesso em: outubro/2023.

ORGANIZAÇÃO MASTER. Tecnologia no Esporte: Conheça os Benefícios, Tendências e 4 Exemplos. Disponível em: master.org.br/noticias/tecnologia-esporte/. Acesso em: outubro/2023.

SANTOS, Henrique C. Utilização da Metodologia Ashby no Projeto de Seleção de Materiais para Para-Choque Traseiro de Caminhão. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023.

SANTOS, Jarbas; MENDES, Maria; ALVES, Michela. Carrinho de rolimã e pedagogia da aventura: Riscando o asfalto. Disponível em: anais.uesb.br/index.php/semgepraxis/article/viewFile/8322/7990. Acesso em: outubro/2023.

SOUZA, Thiago. Pré-História: o que foi, suas características e períodos. Disponível em: todamateria.com.br/pre-historia-resumo/. Acesso em: outubro/2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. Regulamento do Evento de Carrinhos de Rolimã/Lomba do Município de Cachoeira do Sul/RS 2022. Disponível em: ufsm.br/app/uploads/sites/272/2022/08/regulamento-competicao-rolima-2022-v.1-1.pdf. Acesso em: outubro/2023.