



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

THIAGO ABRANTE DE SOUZA

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO UFPBAJA PARA A
SELEÇÃO DE MATERIAIS**

JOÃO PESSOA - PB

2020

THIAGO ABRANTE DE SOUZA

**UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO UFPBAJA PARA A
SELEÇÃO DE MATERIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba como exigência
parcial para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Siderley Fernandes
Albuquerque.

JOÃO PESSOA - PB

2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729u Souza, Thiago Abrante de.

UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO UFPBAJA PARA
A SELEÇÃO DE MATERIAIS / Thiago Abrante de Souza. -
João Pessoa, 2020.

66 f. : il.

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

1. Seleção de Materiais no projeto UFPBaja. 2.
Metodologia Ashby. 3. Diagramas de Propriedades de
Materiais. I. Albuquerque, Siderley Fernandes. II.
Título.

UFPB/BC

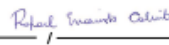
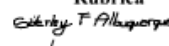


AVALIAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC

NOME Thiago Abrante de Souza **Matricula** 11427800

TÍTULO: UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA ASHBY NO PROJETO UFPBAJA PARA A SELEÇÃO DE MATERIAIS

AVALIAÇÃO

		NOTAS		
Prof. <u>Dr. Bruno Alessandro Silva</u>	<u></u>	<u>9,5</u>	<u>9,0</u>	<u>9,25</u>
	Nome Rubrica	Monografia	Apresentação	Média
Prof. <u>Dr. Rafael Evaristo Caluête</u>	<u></u>	<u>10,0</u>	<u>9,5</u>	<u>9,75</u>
	Nome Rubrica	Monografia	Apresentação	Média
Prof. <u>Dr. Siderley Fernandes Albuquerque</u>	<u></u>	<u>10,0</u>	<u>10,0</u>	<u>10,0</u>
	Nome Rubrica	Monografia	Apresentação	Média

Média Final: 9,7

Situação: ☒ aprovado / ☐ reprovado

RECOMENDAÇÕES:

João Pessoa, 14 de Julho de 2020.

OBS: A implantação da nota no sistema seguirá o disposto na PORTARIA NORMATIVA Nº 02/2018 / CCGEM

Dedico,

Primeiramente a Deus, à minha família em especial ao meu pai Raimundo e minha mãe Maria. E à minha namorada Talita.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado inteligência, persistência e fé para sempre continuar desejando alcançar os objetivos independente das adversidades.

À minha família, em especial aos meus pais Raimundo Vicente de Souza e Maria Abrante do Nascimento que por amor, apoio incondicional e dedicação durante todos estes anos investiram na minha educação e que sem eles não seria possível vencer o desafio da graduação. Aos meus irmãos, Amanda e Benigno, sendo partes fundamentais da minha trajetória. À minha namorada, Talita, por sempre me manter motivado e me fortalecer nos momentos de aflição.

Ao meu orientador Professor Siderley Fernandes Albuquerque pela disponibilidade e paciência em transmitir os ensinamentos ao longo da elaboração dessa pesquisa.

Agradeço também aos professores Bruno Alessandro Silva Guedes de Lima e Rafael Evaristo Caluête por se disponibilizarem a compor a Banca Examinadora.

À UFPB e ao corpo docente do departamento de engenharia mecânica por contribuir diretamente para a o meu desenvolvimento tanto acadêmico, quanto profissional e pessoal.

À equipe UFPBaja pela oportunidade, confiança, auxílio e por todo o conhecimento compartilhado na realização dessa pesquisa.

Enfim, o meu muito obrigado a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação.

RESUMO

Em virtude do número exorbitante de materiais disponíveis para os engenheiros, a utilização de uma metodologia profunda e rigorosa em conjunto com uma ferramenta computacional para selecioná-los torna-se crucial pois além de assegurar a confiabilidade do projeto, garante uma maior qualidade e flexibilidade durante o processo de escolha. Dessa maneira, este trabalho fundamenta-se na utilização da metodologia Ashby mediante o uso do software Ces Edupack como um mecanismo alternativo de seleção dos materiais e que atenda e satisfaça as necessidades de projeto em um veículo competitivo “BAJA SAE” desenvolvido por alunos dos cursos de engenharias do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba. O método adotado de seleção aplicada é conhecido como Metodologia Ashby, desenvolvido por Michael Farries Ashby, consiste no desenvolvimento de um procedimento sistemático e científico para selecionar materiais e processos de fabricação, resultando em um subconjunto que melhor atende os requisitos de um projeto. Atualmente a equipe emprega a seleção de materiais da forma tradicional, caracterizada por ser uma escolha mais superficial, comparando informações de materiais e processos já conhecidos, valores tabelados em livros e da dependência proveniente da vivência de experiências antigas. Então, para demonstrar a metodologia Ashby através do software, foi realizada a seleção de materiais para os componentes disco de freio, braço de suspensão e assoalho tendo como foco a diminuição de massa. Para isso, foram geradas informações através de diagramas de propriedades de materiais que agrupam famílias de materiais com os respectivos índices de material. Dessa forma, a pesquisa selecionou para a fabricação de um disco de freio leve o ferro fundido cinzento, para um braço de suspensão leve os compósitos de matriz metálica e para um assoalho leve o polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP) em matriz epóxi.

Palavras-chave: Seleção de Materiais. Metodologia Ashby. Ces Edupack. Diagramas de Propriedades de Materiais. Índices de Material.

ABSTRACT

Due to the exorbitant number of materials available to engineers, the use of a deep and rigorous methodology in conjunction with a computational tool to select them is crucial because in addition to ensuring the reliability of the project, it guarantees greater quality and flexibility during the choice process. In this way, this work is based on the use of the Ashby methodology through the use of the Ces Edupack software as an alternative material selection mechanism that meets and satisfies the design needs in a competitive vehicle "BAJA SAE" developed by students of the courses of engineering at the Technology Center of the Federal University of Paraíba. The adopted method of applied selection is known as Ashby Methodology, developed by Michael Farries Ashby, which consists of the development of a systematic and scientific procedure to select materials and manufacturing processes, resulting in a subset that best meets the requirements of a project. Currently, the team employs the selection of materials in the traditional way, characterized by being a more superficial choice, comparing information on materials and processes already known, values listed in books and the dependence from old experiences. Then, to demonstrate the Ashby methodology through the software, the selection of materials for the brake disc, suspension arm and floor components was carried out with the focus on reducing mass. For this, information was generated through material property diagrams that group material families with the respective Performance Index. Thus, the research selected for the manufacture of a lighter brake disc the gray cast iron, for a lighter suspension arm the metallic matrix composites and for a lighter floor the carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in epoxy matrix.

Keywords: Material Selection. Ashby methodology. Ces Edupack. Material Property Diagrams. Performance Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Veículo Baja em terreno irregular.....	6
Figura 2 - O “afunilamento” de um típico procedimento de seleção de materiais.....	9
Figura 3 - A estratégia aplicada para a seleção de materiais.....	10
Figura 4 - Índices de material em um veículo do tipo baja.....	14
Figura 5 - Índice de Material resultante da combinação entre função, restrição e objetivo.....	15
Figura 6 - Exemplos nos quais se deseja maximizar pelo índice de mérito.....	15
Figura 7 - Diagrama de barras para o módulo de Young.....	16
Figura 8 - DPM do Módulo de Young em relação à Densidade.....	17
Figura 9 - IM como diretriz de seleção no DPM.....	18
Figura 10 - Parte de um registro para um material	20
Figura 11 - Classificação das bases de dados no software Ces Edupack	21
Figura 12 - Ferramenta <i>Browse</i>	22
Figura 13 - Ferramenta <i>Search</i>	23
Figura 14 - Ferramenta <i>Chart/Select</i>	23
Figura 15 – Função do recurso <i>Chart</i>	24
Figura 16 - Barra de ferramenta de gerenciamento de diagramas	26
Figura 17 - Protótipo P09 Indominável	28
Figura 18 - DPM Resistência à Compressão x Densidade (M_1).....	34
Figura 19 - DPM Coeficiente de Dilatação Térmica x Densidade (M_2).....	34
Figura 20 - DPM Resistência à Fadiga em 10^7 ciclos x Densidade (M_3).....	34
Figura 21 – Diagrama M_1 após a etapa de triagem e eliminação	35
Figura 22 – Diagrama M_2 após a etapa de triagem e eliminação	36
Figura 23 – Diagrama M_3 após a etapa de triagem e eliminação	36
Figura 24 - Diagrama de barras para a densidade	38
Figura 25 - DPM Módulo de Young x Densidade (M_1).....	41
Figura 26 - DPM Tensão de Escoamento x Densidade (M_2).....	41
Figura 27 - Diagrama M_1 após a etapa de triagem e eliminação.....	42
Figura 28 - Diagrama M_2 após a etapa de triagem e eliminação.....	42
Figura 29 - DPM Módulo de Young x Densidade (M_1).....	47
Figura 30 - Diagrama M_1 após a etapa de triagem e eliminação.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Função, restrições, objetivos e variáveis livres.....	11
Quadro 2 - Requisitos de projeto conforme as propriedades dos materiais.	12
Quadro 3 - Tradução dos requisitos de projeto para o disco de freio leve.....	33
Quadro 4 - Classificação dos materiais triados para o disco de freio leve.....	37
Quadro 5 - Documentação dos melhores candidatos para o disco de freio leve.....	37
Quadro 6 - Tradução dos requisitos do projeto de uma bandeja superior leve.	40
Quadro 7 - Materiais classificados do diagrama M_1 para a bandeja superior leve ...	43
Quadro 8 - Materiais classificados do diagrama M_2 para a bandeja superior leve ...	44
Quadro 9 - Documentação dos melhores candidatos para a bandeja superior leve.	45
Quadro 10 - Tradução dos requisitos de projeto para o assoalho leve	46
Quadro 11 - Classificação dos materiais triados para o assoalho leve	48
Quadro 12 - Documentação dos melhores candidatos para o assoalho leve.....	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

S_e	Resistência à Fadiga
σ_c	Resistência à Compressão
σ_e	Tensão de escoamento
Advanced	Insere uma expressão algébrica das propriedades usando um conjunto de operadores
All Materials	Todas as famílias de materiais disponíveis
Al_2O_3	Fibras de Alumina
Browse	Recurso para pesquisa hierárquica de materiais e processos de fabricação
CFRP	Polímeros reforçados com fibra de carbono
Chart Stage	Seleção dos atributos para a plotagem dos Diagramas de Propriedades de Materiais
Chart, Limit e Tree	Gráfico, Limites e Estrutura de organização do tipo Árvore
Chart/Select	Ferramenta computacional para a seleção de materiais e processos de fabricação
CONFEA	Conselho Federal de Engenharia e Agronomia
Define Your Own Subset	Criação de um subconjunto específicos de materiais estabelecido pelo projetista
Double Wishbone	Suspensão duplo A
DPM	Diagramas de Propriedades de Materiais
DTV	Variação da espessura do disco de freio
Eco Audit	Ferramenta de auditoria ecológica
Honeycomb Structure	Estruturas de materiais do tipo colmeia para a construção de peças leves e rígidas
Hot Spotting	Regiões térmicas concentradas
IM	Índice de Material
MaterialUniverse	Conjunto de dados que abrange uma enorme quantidade de materiais
Mechanical Properties	Propriedades mecânicas
MMC	Compósitos com Matriz Metálica
Performance Index Finder	Insere Índices de Material de acordo com seções

	estruturais
PMC	Compósitos com Matriz Polimérica
ProcessUniverse	Conjunto de dados que abrange uma enorme quantidade de processos de fabricação
Producers	Exemplo de Fornecedor para determinado material
RATBSB	Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE Brasil
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
Search	Pesquisar direta para um material
Settings, Apply e Clear	Configuração, Aplicação e Limpeza das restrições dos materiais na função Limit
SiC	Carbeto de Silício
SM	Seleção de Materiais
Synthesizer	Ferramenta para auxílio no estágio inicial do desenvolvimento de produtos.
Thermal Properties	Propriedades térmicas
<i>E</i>	Módulo de Young
<i>α</i>	Coeficiente de dilatação térmica
<i>ρ</i>	Densidade

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo Geral.....	3
1.1.2. Objetivos Específicos	3
1.2. Motivação e Justificativa	4
1.3. Baja Sae	5
1.4. Equipe Baja Ufpb	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. Seleção De Materiais	8
2.2. Metodologia Ashby	9
2.2.1. Tradução.....	10
2.2.2. Triagem e Eliminação	11
2.2.3. Classificação.....	12
2.2.4. Documentação.....	12
2.2.5. Índices de Material.....	13
2.2.6. Diagramas de Propriedades de Materiais.....	16
2.3. Granta Design	19
2.3.1. Ces Edupack	19
2.3.2. Estrutura do Software	21
3. METODOLOGIA	27
3.1. Disco de Freio	28
3.2. Braço de Suspensão	30
3.3. Assoalho	31
4. RESULTADOS	32
4.1. Disco de Freio	32
4.2. Braço de Suspensão	39
4.3. Assoalho	46
5. CONCLUSÃO	50
5.1. Conclusão	50
5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros	51
6. REFERÊNCIAS	52

1. INTRODUÇÃO

A perspectiva histórica da importância em selecionar os materiais sempre esteve atrelada ao desenvolvimento e avanço das sociedades mediante a sua utilização pelo homem para satisfazer suas demandas e necessidades básicas de sobrevivência, exploração de recursos, militares, segurança, conforto, condições de vida, etc. A prova dessa relação está narrada não só nos livros de história como também evidenciada ao longo do tempo pela capacidade humana sem precedentes no sentido de transformar, criar, projetar, manipular e processar os materiais que dispomos em prol dos mais variados tipos de aplicações da nossa vida diária. No sentido de caracterizar a relação evolutiva Homem/Materiais, o Biface¹, o Cobre, o Bronze e o Ferro retratados no período da pré-história pela idade da Pedra e idade dos Metais, podem ser analisados como exemplos da habilidade dos nossos antepassados em dominar os materiais, pois, foram selecionados em função das características específicas de acordo com a aplicabilidade. As quantidades de materiais que se tinham conhecimento nos períodos iniciais da história eram bem reduzidas, entretanto, sabemos que tais disponibilidades limitantes não impediram as suas funcionalidades, proporcionada pelo acontecimento de importantes mudanças nas sociedades no que tange na criação de ferramentas que auxiliavam os diversos tipos de serviços, fabricação de instrumentos de caça e de defesa pessoal, concepção de utensílios agrícolas que possibilitavam uma maior facilidade do trabalho nas plantações, confecção de espadas e outros artefatos bélicos que eram utilizados como armamentos nas guerras territoriais, dentre outros vários conjuntos de funções em todos os seguimentos do cotidiano e modo de vida das pessoas.

A partir do contexto de que os materiais estiveram sempre associados ao Homem no decorrer da história evolutiva pelo desenvolvimento dos grupos populacionais que detinham um padrão mais elaborado e eficiente dos equipamentos e artefatos produzidos, acompanhado em conjunto pelo surgimento de novas classes de materiais, os métodos iniciais de Seleção de Materiais (SM) tornaram-se evidentes. A princípio o uso dos materiais não passava de uma metodologia totalmente e exclusivamente seletiva, que consistia em optar, dentre um conjunto relativamente limitado de materiais, por aquele que mais se adequava a uma dada aplicação em

¹ Instrumento lítico confeccionado pelo povo pré-histórico e utilizado como ferramenta.

virtude de suas características (Callister, 2002), isto é, as particularidades intrínsecas correspondentes às propriedades dos materiais eram negligenciadas, não possuía uma preocupação sob a perspectiva dos requisitos iniciais, das condições e exigências do componente (produto), sendo assim, a SM se resumia na própria experiência. Segundo Ashby (2012) os valiosos conhecimentos que são inerentes ao produto (projeto) eram passados a aprendizes que, quando muito mais velhos, poderiam assumir o papel de guru dos materiais nas empresas em que trabalhavam. Em outras palavras, a escolha do material concentrava-se na restrição de consultores que adotavam e replicavam os critérios subjetivos de seleção a partir da experiência, dessa forma, pelo efeito da estagnação provocada pela invariabilidade, da forte dependência do mercado, fornecedor e consultor detentores dos insumos e da carência em critérios mais profundos e avançados na SM, este modelo baseado na experiência acaba camuflando complicações oriundas da limitação de candidatos para a escolha final do material, da ausência de um banco de dados em função dos múltiplos objetivos que melhor se adequam à solução de problemas, da falta de inovação no projeto quanto aos requisitos cada vez mais desafiadores, além disso, sob a ótica de Ashby (2012), há ainda a arrastada escala de tempo para aprender por experiência, há a mobilidade de empregos, o que significa que o consultor que hoje está ali provavelmente amanhã não estará mais, e também há a rápida evolução das informações sobre materiais.

Nesse cenário e diante das exigências dos atuais estágios de desenvolvimento tecnológico, considerando os elevados níveis de competitividade industrial que caracterizam o mundo atual, um fator de grande relevância e valor primordial para o sucesso dos projetos de engenharia consiste na correta SM, pois quando realizada apresenta uma melhor combinação de propriedades para uma determinada aplicação que atenda algumas considerações, como por exemplo, as condições de serviços que os componentes estão submetidos, a deterioração das relações estrutura/propriedade dos materiais durante a operação, e os aspectos econômicos que precisam estar condizentes, porém, esta atividade pode ser trabalhosa e complexa quando avaliamos o universo grande dos materiais disponíveis aos engenheiros, por isso, há a necessidade de uma metodologia sistemática de seleção que possa ser utilizada por uma ferramenta estratégica que proporcione os benefícios das inovações tecnológicas cibernéticas.

As qualidades oferecidas por essa inovação tecnológica tais como

versatilidade, confiabilidade, flexibilidade, segurança na tomada de decisão, precisão, organização dentre outras, serão abordadas neste trabalho pelo uso das funcionalidades de um software como procedimento alternativo no que se refere à SM de alguns componentes do veículo competitivo “BAJA SAE” desenvolvido por alunos dos cursos de engenharias do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba cujo propósito compreende projetar e construir um veículo monoposto, fora-de-estrada, esportivo que seja capaz de realizar manobras em qualquer terreno com o máximo desempenho de confiabilidade em termos de conforto, segurança, velocidade, aceleração, tração e durabilidade a fim de participar em competições nacionais e internacionais.

O procedimento de seleção que o software estabelece foi desenvolvido por Michael F. Ashby, denominado como Metodologia Ashby, de forma sistemática abrange os parâmetros para a decisão dos limites do problema e, a partir desses, a elaboração de critérios que podem ser usados para maximizar o desempenho ou minimizar outras características dos componentes do projeto, referente a isso, é apresentado o critério de otimização conhecido como Índice de Material (IM), cuja função é mostrar os melhores candidatos que atendem a um ou mais objetivos específicos através dos Diagramas de Propriedades de Materiais (DPM) que são gráficos dos valores de uma propriedade do material em função dos valores de outra propriedade, tendo nas áreas de maior concentração o agrupamento de classes de materiais enquanto que nas subáreas são preenchidas por materiais individuais.

1.1. Objetivos

1.1.1. *Objetivo Geral*

Afigura-se como objetivo geral realizar a seleção de materiais leves para o disco de freio, braço de suspensão e assoalho do protótipo da equipe UFPBaja através de um procedimento sistemático conhecido como metodologia Ashby que pode ser desenvolvido a partir do software Ces Edupack.

1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Evidenciar uma evolução na maneira de como é realizada a SM como um todo,

destacando a eficácia pautada na flexibilidade e versatilidade computacional;

- Estabelecer uma estratégia para o conhecimento eficiente do software Ces Edupack para os projetos da UFPB que necessitem de uma seleção de materiais;
- Tornar um recurso de aprendizado auxiliar na disciplina de Seleção e Uso de Materiais para os alunos do curso de engenharia mecânica e áreas afins, através de uma aplicação completa de SM em uma análise de um projeto concreto pertencente ao ambiente vivenciado pelos estudantes da UFPB;
- Desenvolver a capacidade crítica de analisar casos que se façam necessário técnicas de SM visando a melhor escolha para um determinado componente tendo em vista os requisitos do projeto e propriedades dos materiais, além das restrições impostas pelo orçamento financeiro (custo), disponibilidade ou mercado.

1.2. Motivação e Justificativa

A disseminação de tecnologias e consequentemente a expansão dos meios informacionais no início da globalização trouxeram uma nova perspectiva de exigências para o mercado de consumo, possuindo a base de transformação na maneira de como a idealização dos produtos\componentes era realizada. Dessa forma, o processo de melhorar a performance do projeto desde a elaboração da ideia inicial até o produto final se destacou como uma diferenciação importante que levaram as empresas que estavam inseridas em um contexto representado por uma crescente competitividade em vários setores da indústria, buscarem cada vez mais por mecanismos que disponibilizassem aspectos de otimização do produto\componente. Com o passar do tempo as inovações tecnológicas em conjunto com os investimentos em prol do desenvolvimento de novos materiais alcançaram um planejamento estratégico no qual se observou na SM uma das principais atividades responsáveis por essa diferenciação que o projeto necessitava, pois o procedimento de selecionar um material acabou mostrando ser essencial devido ao seu caráter de tomada racional de decisão ser um processo sistemático contido em todas as etapas de criação, assim como também ser um critério analítico para a garantia da qualidade relativa a funcionalidade de acordo com o conjunto de múltiplas especificações intrínsecas ao projeto.

Ao longo dessas mudanças pautadas na estrutura de criação do projeto e pela imensa quantidade de materiais disponíveis atualmente, cerca de 160 mil ou mais segundo Ashby (2012), as atribuições do profissional de engenharia mecânica estabelecida pela Resolução 218 do CONFEA tornaram-se, neste universo grande dos materiais, ainda mais importantes e necessárias, pois são desenvolvidas obedecendo a múltiplos critérios de acordo com a dimensionalidade do problema, as variáveis do projeto e o conhecimento dos materiais, nas quais os fundamentos de engenharia devem ser aplicados envolvendo geralmente uma abordagem matemática (Shigley, 2005). Com isso, a atividade de SM sem a flexibilidade de uma ferramenta sofisticada que forneça a seleção com base em uma metodologia sistemática, torna-se uma tarefa árdua e frustrante que pode prejudicar a qualidade do projeto com relação ao andamento (tempo), aos custos, aos esforços e assim por diante.

Visando contornar esses problemas acima, e também entendendo que a equipe UFPBaja emprega a seleção de materiais da forma tradicional, comparando informações de materiais já conhecidos, valores tabelados em livros e da dependência proveniente da vivência de experiências antigas, a utilização de uma ferramenta computacional de SM é essencial para a otimização do projeto. Foram esses motivos que despertaram a concepção desse estudo, no sentido de contribuir com os trabalhos que vêm sendo realizados no aperfeiçoamento dessas atividades, aplicando conhecimentos da Engenharia e da Ciência de Materiais adquiridos durante o curso.

1.3. Baja Sae

O projeto MINI BAJA, hoje conhecido como BAJA SAE é uma competição organizada pela *Society of Automotive Engineers* (SAE), criada na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sob a direção do Dr. John F. Stevens, sendo a primeira competição ocorrida em 1976. O ano de 1991 marcou o início das atividades da SAE BRASIL, que, em 1994, lançava o Projeto Baja SAE BRASIL. No ano seguinte, em 1995, era realizada a primeira competição nacional, na pista Guido Caloi, bairro do Ibirapuera, cidade de São Paulo. A partir de 2003 a competição passou a ser realizada em Piracicaba, interior de São Paulo. Desde 1997 a SAE BRASIL também apoia a realização de eventos regionais do BAJA SAE BRASIL, através de suas Seções Regionais (nomeadas como Etapa Sul, Sudeste e Nordeste). As etapas da competição não são complementares e a equipe vencedora do Baja nacional ganha o direito de competir da etapa internacional da prova nos Estados Unidos. (SAE

BRASIL, s.d.)

O objetivo do Programa BAJA SAE compreende projetar e construir um veículo monoposto, fora-de-estrada, esportivo que seja capaz de realizar manobras nos mais diferentes tipos de terreno (figura 1) com o máximo desempenho de confiabilidade em termos de conforto, segurança, velocidade, aceleração, tração e durabilidade a fim de participar em competições nacionais e internacionais.

Figura 1 - Veículo Baja em terreno irregular



Fonte: Revista Publracing2

Os protótipos são avaliados pela organização do evento nos seguintes quesitos: Avaliação de Projeto, Eventos Dinâmicos e Enduro de Resistência. A Avaliação de Projeto consiste em apresentar a qualidade e a extensão do desenvolvimento do projeto integral do veículo e também analisar a organização da equipe para registrar e apresentar os resultados obtidos. (RATBSB, 2019)

Esta avaliação é composta por quatro provas complementares: Relatório de Projeto, Apresentação de Projeto, Avaliação de Projeto Dinâmico e Apresentação Final de Projeto. Os Eventos Dinâmicos destinam-se a avaliar o funcionamento dos veículos sob uma variedade de condições, tais como: Aceleração, Retomada, Tração, Super Prime, Suspensão e Manobrabilidade. No Enduro de Resistência, os veículos devem completar voltas em uma pista de terreno irregular, fora de estrada, com obstáculos, em qualquer condição climática, por um período de quatro horas. (RATBSB, 2019)

² Disponível em: <<https://www.revistapublracing.com.br/post-1/competi%C3%A7%C3%A3o-baja-sae-brasil-2020-traz-novos-desafios-para-as-73-equipes-inscritas>>. Acesso em: 30 mar. 2020.

1.4. Equipe Baja Ufpb

Denominada UFPBaja, a equipe responsável pelo projeto e fabricação de um veículo competitivo “BAJA SAE”, foi fundada em outubro de 2005 por iniciativa dos irmãos Pedro, Paulo e João Araújo. Inicialmente, quem mostrou o caminho de como fazer um Baja foi a equipe da Universidade Federal de Pernambuco. De 2006 em diante, quando ficou pronto o primeiro protótipo, o P01-Impreterível, a equipe não parou de evoluir. (Garagem83, 2011)

Durante esses 14 anos de existência a equipe passou a ser organizada em Comitês e Grupos de Engenharia. Os Comitês têm caráter fixo e formam a administração e gestão de RH e Financeiro. Os grupos de engenharia têm suas atividades limitadas a períodos de tempo específicos de acordo com o cronograma de cada programa. São eles: Planejamento do Produto, Desenvolvimento dos Sistemas, Construção do Protótipo e Testes/Validação. Atualmente o projeto tem 26 integrantes, de calouros a formandos. Ao ingressarem no projeto, os integrantes recebem um treinamento básico geral de automobilística, *SolidWorks*, CAD, PDP e desenvolvimento virtual do produto. Após o período de estágio são designados para um sistema específico do veículo no qual faz parte de todos os grupos de engenharia ao longo dos programas. Depois de alocados, um treinamento aprofundado é ministrado com auxílio de bibliografia específica e treinamento das funcionalidades aplicáveis dos softwares. Ao longo desses anos de criação e instalação do projeto, já participaram do programa de treinamento diversos alunos de engenharia (Mecânica, Produção, Elétrica, Materiais e Ambiental), tornando-se membros efetivos e tiveram a experiência no desenvolvimento de produtos, do projeto à viabilização. (SIGAA UFPB, 2019). Para uma maior produtividade e aproveitamento no gerenciamento do projeto, a equipe é dividida nos seguintes subsistemas: *Powertrain*, Suspensão e Direção, Freios e Acionamentos, Estrutura, Elétrica, CAD & CAE, Recursos Humanos, Custos e Marketing.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Seleção De Materiais

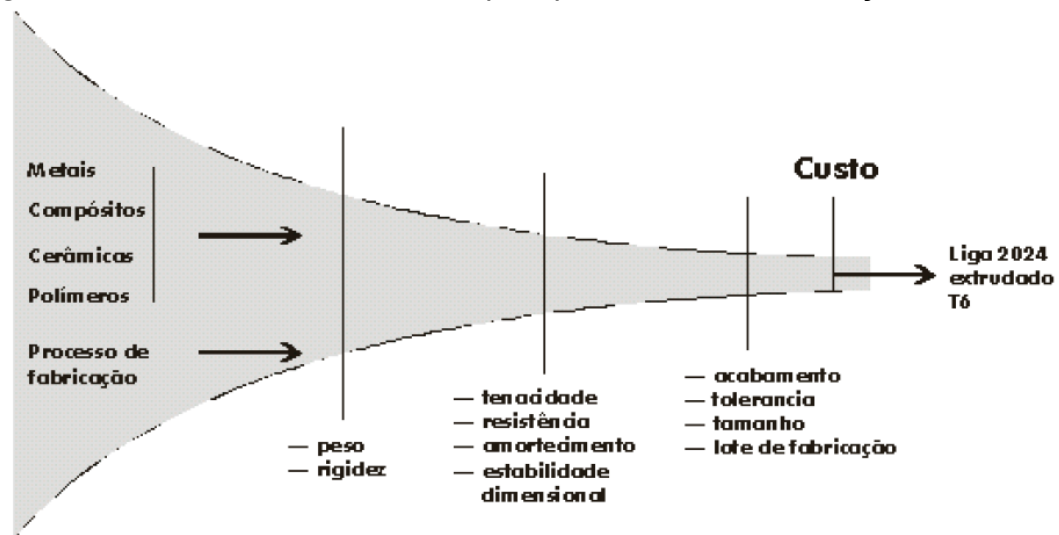
A atividade de escolher o material, além de ser uma das tarefas mais importantes e complexas do processo de projeto, tornou-se uma prática indispensável por engenheiros e projetistas no qual sempre tiveram como missão o grande desafio de escolher, entre os milhares de materiais disponíveis atualmente, o mais apropriado para uma determinada aplicação, considerando essencialmente suas propriedades, formas, preços e disponibilidade de se encontrar o material no fornecedor, associado aos custos das ferramentas e maquinário para conformá-lo. A qualidade final de um componente/produto depende da SM, em função disto, a engenharia possibilita aos engenheiros e projetistas inúmeras técnicas de otimização aos quais múltiplos critérios são considerados para melhor eleger o material mais eminente que satisfaça os requisitos do projeto.

Estudos e pesquisas envolvendo as inovações tecnológicas na área dos materiais representam uma evolução da SM, que por sua vez permitem inúmeras oportunidades de desenvolvimento na produção de novos produtos/componentes de forma sustentável a atender aos requisitos de qualidade que são exigências da fabricação. Dessa forma, para que essas oportunidades possam ser usufruídas ao máximo, Ferrante (2000), observa que o processo de SM deve seguir o aspecto de um funil (figura 2), no sentido de que a cada fase do projeto a quantidade de materiais selecionados como opções viáveis diminuem mediante critérios que eliminam os candidatos de acordo com as restrições impostas pelos requisitos até se chegar ao material final escolhido.

Como ocorre igualmente em qualquer outra tarefa do projeto, a agilidade, a eficácia e um padrão sistemático devem ser as principais características de um processo de seleção que execute a atividade de nomear as melhores opções, por essa razão, Ferrante e Walter (2010) estabelecem que o ponto de partida da evolução da SM em etapas empíricas como metodologia estruturada deve-se ao engenheiro britânico da Universidade de Cambridge, Michael Ashby. Sendo realizada no final dos anos 1980, a partir desta metodologia uma inovação na maneira de escolher materiais se tornou evidente para o projeto. As propriedades, os materiais, os processos e as geometrias foram estudados em um nível mais robusto de relação envolvendo classes e subclasses. Foram elaboradas associações de equações matemáticas (batizadas

de IM) que permitem interligar as propriedades e o comportamento do material de acordo com uma função específica. E por fim, os DPM que são gráficos dos valores de uma propriedade em função dos valores de outra propriedade, possibilitando o comparativo entre as famílias de materiais.

Figura 2 - O “afunilamento” de um típico procedimento de seleção de materiais

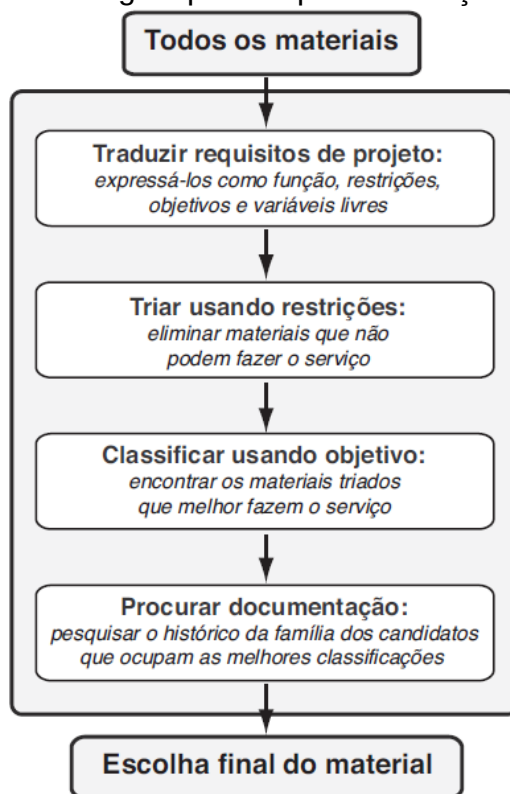


Fonte: Ferrante, 2000, p. 4

2.2. Metodologia Ashby

A estratégia criada por Ashby (2012) consiste basicamente em quatro etapas: traduzir os requisitos de projeto em restrições e objetivos; triar os materiais que não podem cumprir as restrições; classificar os candidatos usando os objetivos e procurar por informações de apoio a tomada de decisão dos materiais mais promissores. (figura 3)

Figura 3 - A estratégia aplicada para a seleção de materiais



Fonte: Ashby, 2012, p. 93

2.2.1. Tradução

De acordo com Ashby (2012), esta primeira etapa, denominada tradução, é a responsável por representar o elo entre os requisitos do projeto com as propriedades dos materiais a partir de uma clara declaração dos seguintes parâmetros:

- **Função:** Qualquer componente de engenharia precisa desempenhar uma ou mais funções, como por exemplo, suportar uma carga, conter uma pressão ou transmitir calor.
- **Restrições:** As funções são alcançadas mediante as restrições que os componentes precisam estar submetidos, como por exemplo, fixar certas dimensões da peça, suportar as cargas de projeto sem falhar, precisa isolar ou conduzir calor ou eletricidade e assim por diante. Portanto, uma restrição é expressa como um limite imposto a um atributo (propriedade) de material ou de processo de fabricação.
- **Objetivos:** Um objetivo é uma quantidade para a qual procura-se um valor

extremo (um máximo ou um mínimo). Um componente é projetado para atender a um ou mais critério (propósitos) de excelência, tal como minimizar custo ou maximizar resistência ao impacto, o mais leve ou o mais seguro, bem como alguma combinação dessas propriedades.

- Variáveis livres: Os parâmetros que não são limitados pelos requisitos de projeto podem ser ajustados para otimizar os objetivos, sendo o mais importante a escolha do material para o componente e o processo de fabricação.

De forma detalhada o quadro 1 apresenta uma síntese da etapa de Tradução.

Quadro 1 - Função, restrições, objetivos e variáveis livres

Tradução	Detalhamento
Função	O que o componente faz? Ex.: Viga submetida à flexão.
Restrições Absolutas	Quais as condições não negociáveis que o projeto deve cumprir? Ex.: módulo de Young > 20 GPa.
Restrições Negociáveis (ou funcionais)	Quais são as condições negociáveis, porém desejáveis, que o projeto deve cumprir? Ex.: se o material for reciclável é melhor.
Objetivo	O que deve ser minimizado ou maximizado? Ex.: minimizar massa e custo.
Variável livre	Quais os parâmetros do problema o projetista está livre para mudar? Ex.: espessura do material.

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.2. Triagem e Eliminação

A característica dessa segunda etapa, chamada Triagem e Eliminação, de acordo com Ashby (2012) está na eliminação daqueles materiais que não podem satisfazer as restrições porque uma, ou mais, de suas propriedades está fora dos limites estabelecidos, restando assim no final da triagem e eliminação apenas um pequeno conjunto de candidatos aptos à próxima etapa.

Os requisitos de projeto para um produto determinam o que ele deve fazer, mas não especificam quais as propriedades seus materiais devem apresentar, ou seja, o projetista precisa explorar os requisitos sob a perspectiva imposta pelos limites dos atributos. Por isso, na etapa de triagem e eliminação, os materiais bem sucedidos devem cumprir os limites dos atributos. Alguns exemplos dessa interpretação estão

no quadro 2.

Quadro 2 – Requisitos de projeto conforme as propriedades dos materiais

Requisitos	Limites das Propriedades
O componente deve funcionar em água fervente	Maximizar temperatura de serviço
Deve ser transparente	Maximizar transparência ótica
Deve ser o mais inquebrável possível	Maximizar tenacidade à fratura
Deve possuir um peso leve	Minimizar a densidade
Deve ser barato	Minimizar o preço
Deve ser o mais rígido possível	Maximizar o módulo de Young
Deve dificultar a passagem de calor	Minimizar a condutividade térmica
Deve facilitar a passagem de calor	Maximizar a condutividade térmica

Fonte: Elaborado pelo autor

2.2.3. Classificação

Como na etapa de Triagem e Eliminação o foco está no isolamento dos materiais que são capazes de atender os requisitos através dos limites das propriedades, nessa terceira etapa chamada de Classificação, a finalidade segundo Ashby (2012), está em identificar entre os candidatos àqueles que podem fazer melhor o serviço. Para isso, é necessário utilizar um critério de excelência que são encontrados nos IM (índices de materiais), cuja definição está associada à maximização de algum aspecto do desempenho para um dado projeto.

Nesse contexto, maximizar ou minimizar uma única propriedade maximiza o desempenho, dessa forma, nos materiais que dissipam calor o máximo desempenho está em maximizar a condutividade térmica; em materiais flutuantes o máximo desempenho está em minimizar a densidade; em materiais que precisam ser baratos o máximo desempenho está em minimizar o custo e assim por diante. Todavia, frequentemente, não é só uma propriedade que é relevante, mas um grupo delas, por exemplo, em um tirante leve e rígido o máximo desempenho está em maximizar a rigidez específica E/ρ .

Portanto, a propriedade (ou grupo de propriedades) que maximiza desempenho para um dado projeto é denominada seu IM, com isso, permite classificar os materiais por sua capacidade de ter bom desempenho na aplicação dada.

2.2.4. Documentação

Uma vez identificado pelas etapas anteriores um pequeno número de

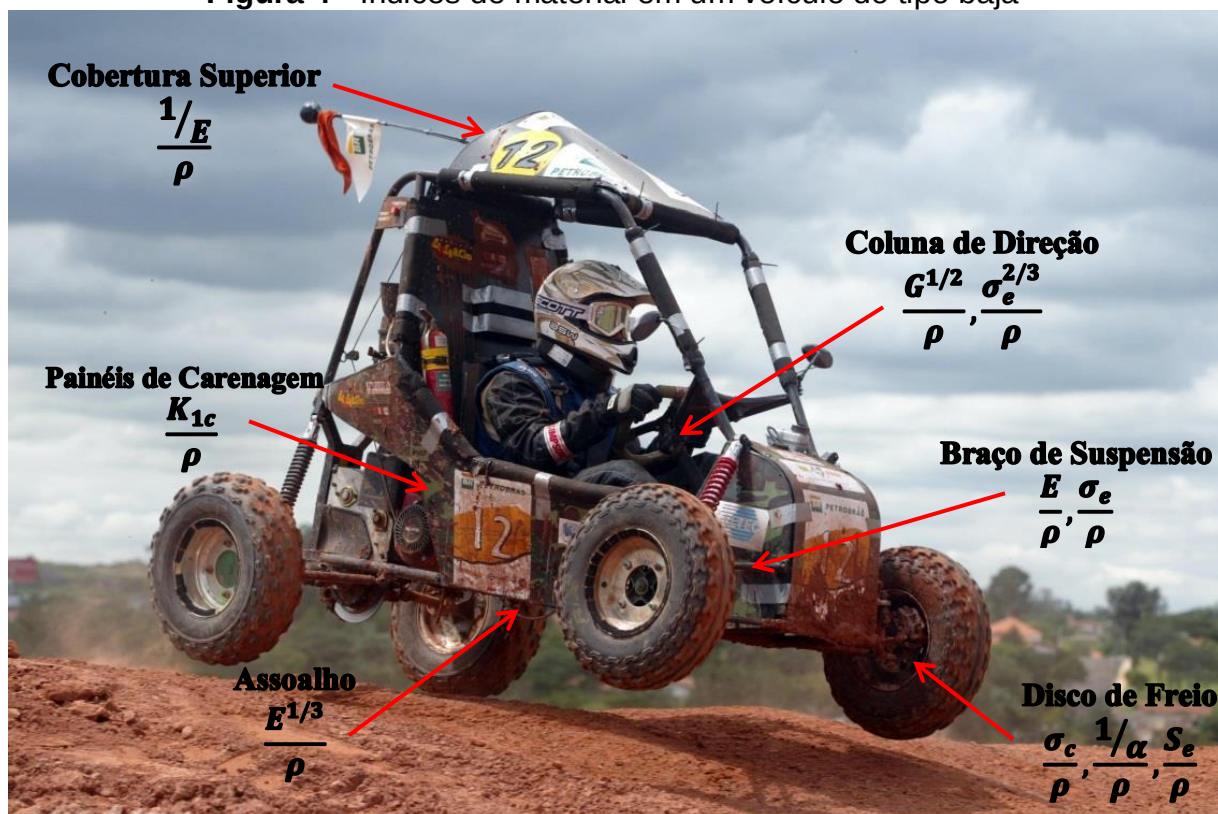
potenciais candidatos que cumprem as restrições e maximizam ou minimizam o critério de excelência (IM), podemos procurar um perfil detalhado de cada candidato, essa etapa é definida por Ashby (2012) como documentação. Esta etapa é caracterizada pela busca de informações dos materiais identificados com relação às fraquezas ocultas, se tem boa reputação, se tem um bom histórico de serviço, em resumo, qual a sua classificação de crédito.

A forma de apresentação da documentação normalmente é descritiva, gráfica ou pictórica como estudos de casos de utilizações anteriores do material, análises de falha e detalhes de seu comportamento em relação à corrosão em determinados ambientes, de sua disponibilidade e preço, das advertências quanto ao seu impacto ambiental ou toxidez. Essas informações são encontradas em manuais, planilhas de dados de fornecedores, fontes de dados em CD, e sites de alta qualidade. Explorar mais a fundo os candidatos mais promissores ajudar a perceber alguma necessidade especial dos materiais classificados bem como, uma seleção mais robusta de acordo com a relação envolvendo os requisitos de projeto e atributos de materiais e processos.

2.2.5. Índices de Material

Os índices de material tornam-se evidentes a partir dos esforços que o componente precisa ser submetido, por exemplo, na combinação ou não de carregamentos de tensão axial, flexão, torção e compressão, etc. Na figura 4, estão sendo representados alguns componentes de um protótipo do tipo baja cuja carga descreve um elemento funcional, como por exemplo, a coluna de direção subentende um eixo carregado sob torção, o braço de suspensão assume como um tirante carregado sob tração, o assoalho como um painel carregado sob flexão, e em função disso, são expressos os índices de material por meio de fórmulas algébricas que buscam estabelecerem uma conexão das propriedades dos materiais que, quando maximizadas, fazem com que o desempenho do material em uma determinada aplicação específica seja elevado.

Figura 4 - Índices de material em um veículo do tipo baja



Fonte: Universidade de São Paulo, adaptação do autor³

Como visto anteriormente, no estágio de tradução o objetivo é caracterizado como um critério de excelência para o projeto, algo a ser minimizado (como custo, peso ou volume) ou maximizado (como armazenamento de energia), cuja aplicação na parte da classificação requer uma simples modelagem para identificar os IM.

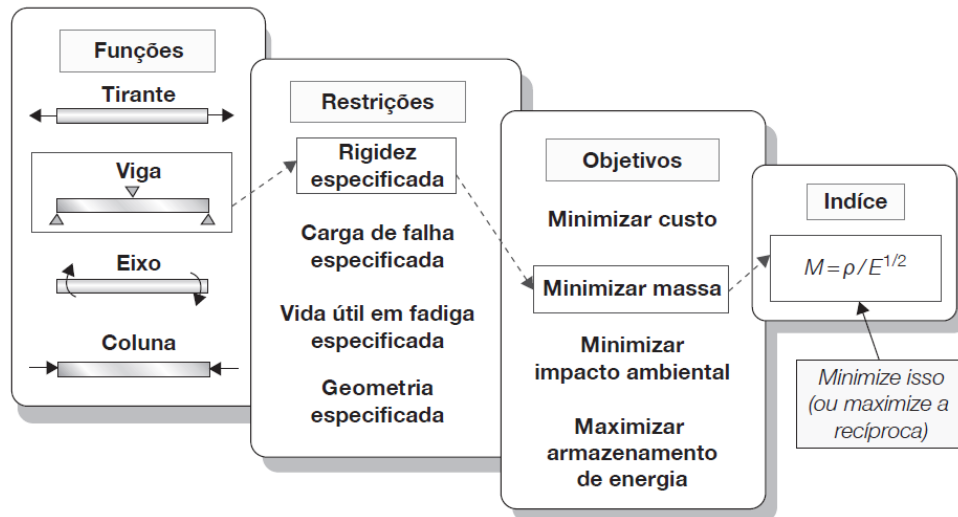
Esses índices realizam uma junção de todas as propriedades de um material de acordo com a função que será explorada pelo componente, fazendo com que as características desejáveis do projeto sejam atendidas, como por exemplo, um componente que suporte carga de tração, possuindo como requisito de projeto não ser pesado e ser seguro, isto é, tratando o componente como um tirante leve e forte, o IM garante que a resistência seja avaliada junto com a densidade, ao invés de analisar a resistência separadamente da densidade.

Segundo Ashby (2012), a ligação da função, restrição e objetivo resulta em um IM (figura 5), sendo por seu intermédio que os limites das propriedades (quadro 2) de interesse devem proporcionar o máximo desempenho do material para uma função

³ Disponível em: <http://www.usp.br/ldsv/?page_id=394>. Acesso em: 31 mar. 2020.

específica, como por exemplo, os projetos que lidam com os mecanismos de transporte, a otimização possui como um bom ponto de partida o peso mínimo, pois quanto mais leve o sistema, menos combustível consome e menos carbono emite.

Figura 5 - Índice de Material resultante da combinação entre função, restrição e objetivo



Fonte: Ashby, 2012, p. 103

A figura 6 fornece alguns exemplos de índices tendo a sua estrutura a partir da natureza do problema que eles caracterizam.

Figura 6 - Exemplos nos quais se deseja maximizar pelo índice de mérito

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

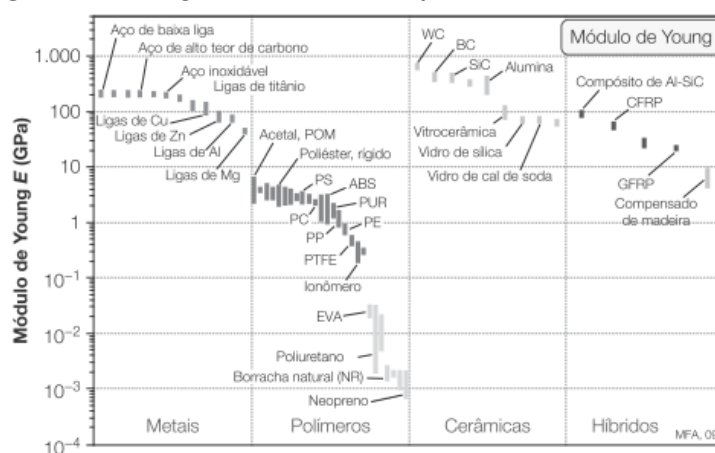
Fonte: Ashby, 2012, p. 103

2.2.6. Diagramas de Propriedades de Materiais

As planilhas de dados dos materiais apresentam listas dos seus atributos de forma separada, porém, o desempenho de um componente depender de apenas uma propriedade é raro, as planilhas de dados não dão nenhuma comparação da combinação de propriedades. Com isso, Ashby (2012) sugere a ideia de construir Diagramas de Propriedades de Materiais (DPM), que podem ser de dois tipos: diagramas de barras e diagramas de balões. Além de oferecerem uma visão geral das propriedades funcionais dos materiais, sintetizam um grande acervo de informações em uma forma compacta, fazendo com que os DPM se tornem ferramentas para a seleção otimizada de materiais que cumpram determinados requisitos de projeto, e também contribuem a entender a utilização de materiais em produtos existentes.

Um diagrama de barras é simplesmente uma representação gráfica de uma propriedade para todos os materiais existentes. A figura 7 mostra um exemplo, é um diagrama de barras para o módulo de elasticidade, E . Cada barra descreve um material, o comprimento de cada barra mostra a faixa da propriedade (módulo de elasticidade ou Young) para cada material, segregado por família. Outro aspecto está na representação em escalas logarítmicas ao invés da escala linear, a explicação está na enorme diferença da faixa característica dos materiais: os metais e cerâmicas têm módulos altos, os dos polímeros são menores, por um fator de aproximadamente 50 do que os dos metais, os dos elastômeros são ainda, aproximadamente, 500 vezes menores, os híbridos têm uma faixa ampla, de baixa a alta, logo, a faixa total é grande para ser plotada e visualizada na escala linear, portanto, as escalas logarítmicas são utilizadas.

Figura 7 - Diagrama de barras para o módulo de Young

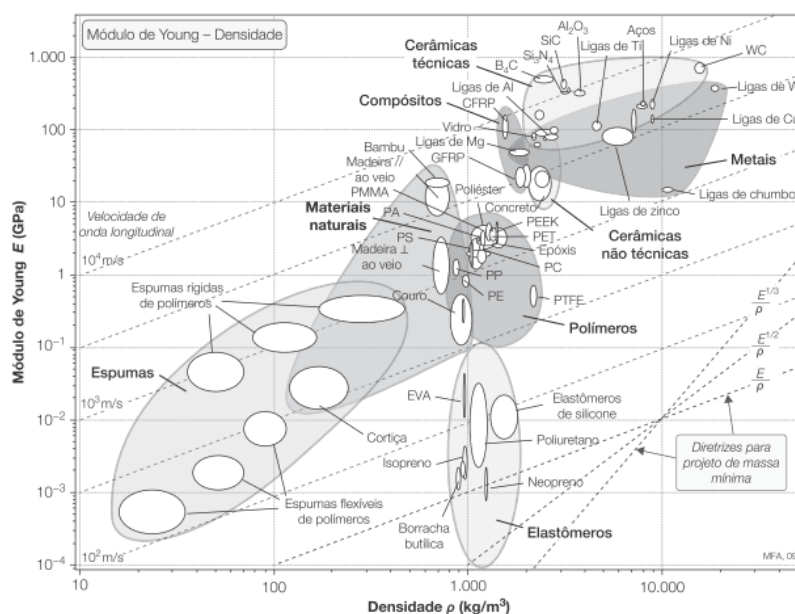


Fonte: Ashby, 2012, p. 54

Mais informações podem ser encontradas se duas propriedades forem representadas em gráfico por um diagrama do tipo balões (ou bolhas), ilustrado como no exemplo da figura 8, uma propriedade (Módulo de Young) é representada no eixo vertical em relação à outra (Densidade) no eixo horizontal, note-se que dados para uma família são englobados em um envelope de propriedade, dentro de cada envelope encontram-se balões brancos que contêm classes e subclasses. A separação entre as famílias é mais distinta: todos os metais encontram-se perto da parte superior direita; todos os polímeros encontram-se no centro, elastômeros no envoltório, logo abaixo, cerâmicas, na parte superior. Pelo mesmo motivo do diagrama de barras, os diagramas de balões também são representados em escalas logarítmicas.

Para um acesso rápido às comparações de materiais, a figura 8 mostra que da família dos Metais, a classe mais leve é a das ligas de magnésio e a mais pesada é a das ligas de tungstênio, que por sua vez também são as mais rígidas e as ligas de chumbo são as menos rígidas.

Figura 8 – DPM do Módulo de Young em relação à Densidade



Fonte: Ashby, 2012, p. 55

Em relação às linhas tracejadas que cortam de ponta a ponta o DPM, elas representam a velocidade de onda longitudinal, ou seja, a velocidade de ondas elásticas em um material e as frequências das vibrações naturais de um componente, por exemplo, o diagrama da figura 8 mostra que ligas de zinco, ligas de cobre e ligas

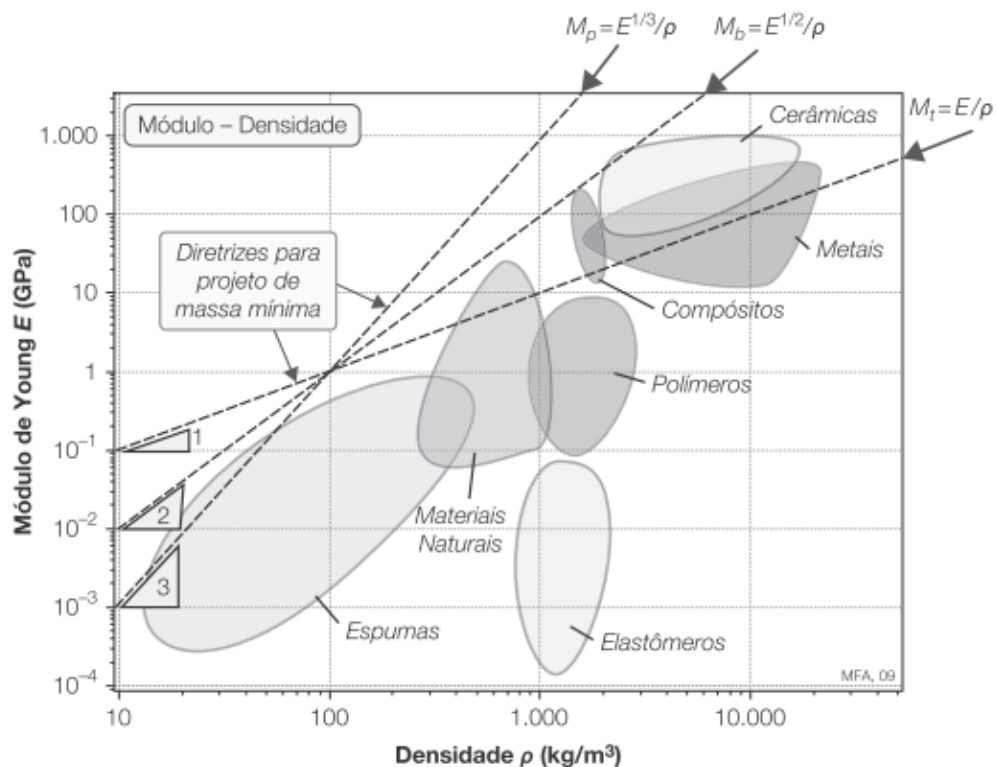
de tungstênio têm velocidade de onda longitudinal próxima a 300 m/s.

Os IM também podem ser representados como contornos nos diagramas de balões. Na figura 9, considerando o índice E/ρ na forma logarítmica:

$$\log(E) = \log(\rho) + \log(C)$$

Descreve uma família de retas paralelas de inclinação 1 em um gráfico de $\log(E)$ em relação à $\log(\rho)$, e cada linha corresponde a um valor da constante C . Repetindo o raciocínio para os índices $E^{1/2}/\rho$ e $E^{1/3}/\rho$, encontra-se um conjunto de retas com inclinação 2 e inclinação 3, respectivamente. Essas retas são chamadas de diretrizes de seleção (ou linha-guia), no qual os materiais que são interceptados pela reta possuem o mesmo IM, todos os que estiveram acima são melhores, e os que ficarem abaixo da linha são ditos como piores. Os outros índices de materiais provenientes de restrições e objetivos diferentes são usados de modo semelhante conforme esta análise.

Figura 9 – IM como diretriz de seleção no DPM



Fonte: Ashby, 2012, p. 106

2.3. Granta Design

Fundada em 1994 pelos professores Mike Ashby e David Cebon, a Granta Design desenvolve softwares para gerenciar materiais e informações de processos em empresas de engenharia e uma série de ferramentas (ES Selector, CES Edupack, entre outros) para aplicar esses dados a decisões importantes de design de produtos e materiais. Os clientes da empresa abrangem uma ampla variedade de setores, incluindo aeroespacial, militar, dispositivos médicos, automotivo, esportes a motor, equipamentos industriais de consumo e produção de materiais. Seminários, atividades, banco de dados atualizados e informações são oferecidos na área de educação em materiais para várias universidades e pessoas interessadas no mundo inteiro, o que faz da Granta Design uma organização líder mundial no campo da tecnologia da informação em materiais. (GRANTA DESIGN, 2019)

2.3.1. Ces Edupack

Com o ímpeto cada vez maior em relação ao desempenho, economia e eficiência, e o imperativo de evitar danos ao ambiente, fazer a seleção ótima dentro da imensa quantidade de materiais disponíveis para o engenheiro nos dias atuais, cerca de 160 mil ou mais segundo Ashby (2012), torna-se muito importante. Então, como lidar com esse vasto acervo de informações? Diferentemente do que acontecia em períodos passados cuja documentação e fonte de dados dos materiais e processos eram realizadas frequentemente na forma de manuais, ocorre que hoje o panorama é outro; o advento do armazenamento e manipulação digitais de informações em virtude do avanço na capacidade computacional e a rede mundial de computadores. (GRANTA DESIGN, 2019)

O projeto auxiliado por computador é uma parte-padrão do treinamento de um engenheiro, e é apoiado por pacotes amplamente disponíveis para modelagem de sólidos, análise de elementos finitos, otimização e seleção de materiais e processos. Os softwares disponíveis para a seleção de materiais e processos recorrem a bancos de dados de atributos de materiais e processos, que documentam sua compatibilidade mútua e permitem que sejam pesquisados e apresentados de modo a habilitar seleções que melhor cumpram os requisitos de um projeto.

Com um sistema de informações e seleção, o software Ces Edupack é um exemplo que usa uma estrutura de dados numéricos, texto e informações com base

em imagens. A Figura 10 mostra parte de um registro para um material.

Figura 10 - Parte de um registro para um material

Acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS)

O Material

ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno) é tenaz, resiliente e fácil de moldar. Normalmente é opaco — embora alguns graus podem ser transparentes —, e pode ser colorido com cores vividas. Ligas ABS-PVC são mais tenazes do que o ABS-padrão e, em graus autoextintores, são usados para carcaças de ferramentas elétricas.



Propriedades gerais

Densidade	1 e 3	—	1, 2 e 3	kg/m ³
Preço	2	—	2,7	dólares/kg

Propriedades mecânicas

Módulo de Young	1,1	—	2,9	GPa
Dureza – Vickers	5,6	—	15	HV
Limite de elasticidade	19	—	51	MPa
Resistência à tração	28	—	55	MPa
Resistência à compressão	31	—	86	MPa
Alongamento	1,5	—	1 e 2	%
Limite de fadiga	11	—	22	MPa
Tenacidade à fratura	1,2	—	4,3	MPa.m ^{1/2}

Propriedades térmicas

Condutividade térmica	0,19	—	0,34	W/m.K
Expansão térmica	85	—	230	μ deformação/°C
Calor específico	1.400	—	1.900	J/kg.K
Temperatura de transição vítrea	88	—	130	°C
Temperatura máxima de serviço	62	—	90	°C

Propriedades elétricas

Resistividade	2,3 e 21	—	3 e 22	μ ohm.cm
Constante dielétrica	2,8	—	2,2	

Usos típicos

Capacetes de segurança; capotas de trailers; painéis de instrumentos de automóveis e outros componentes internos; acessórios hidráulicos; dispositivos de segurança doméstica e carcaças para eletrodomésticos de pequeno porte; equipamentos de comunicação; máquinas comerciais; ferragens de tubulação; grades de automóveis; capas de proteção de rodas; molduras de espelhos; revestimentos internos de refrigeradores; malas de viagem; bandejas; capas de proteção para cortadores de grama; cascos de barcos; peças de grande porte para veículos de recreação; vedações contra intempéries; contas de vidro, fusíveis para refrigeradores, tubulação para sistemas DWV (*drain-waste-vent* — bueiros de drenagem de esgoto).

Fonte: Ashby, Shercliff e Cebon, 2012, p. 24, adaptação do autor

Seguindo esta lógica, o Ces Edupack é considerado um dos principais recursos de ensino no campo da engenharia, materiais, design e processamento. Ashby e alguns outros colegas da Universidade de Cambridge deram origem ao conceito de criação do CES Edupack com a ajuda do grupo Granta Design. (GRANTA DESIGN, 2019)

O CES Edupack estabeleceu recursos abrangentes com diversas bibliotecas organizadas em hierarquias e opções fáceis de usar para acessar os materiais e processos disponíveis no mundo. Estes dados foram aumentando gradativamente a partir de atualizações proveniente de novos materiais, vários livros, palestras, projetos e exercícios. Como resultado, foi desenvolvido um recurso exclusivo para analisar materiais sob a perspectiva das propriedades ecológicas, agregando métodos de projeto sustentável nas áreas de estudo, que incluem engenharia mecânica, engenharia industrial, design de produtos, ciência dos materiais

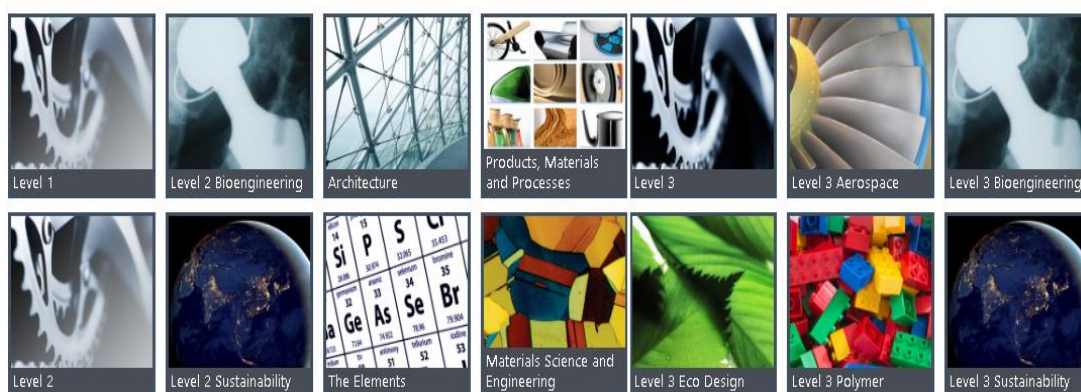
e outros assuntos relevantes. (GRANTA DESIGN, 2019)

Dessa forma, o Ces Edupack faz-se uma importante ferramenta em todos os anos de estudos de graduação e pós-graduação e até mesmo para fins de pesquisa e ensino, comprovando-se assim uma ótima alternativa na seleção de materiais e processos para o projeto.

2.3.2. Estrutura do Software

As bases de dados do programa Ces Edupack compreendem as diversas aplicações que envolvem a engenharia como um todo, sendo classificadas de acordo com duas categorias diferentes: Introdotório e Avançado, como mostra a figura 11.

Figura 11 - Classificação das bases de dados no software Ces Edupack

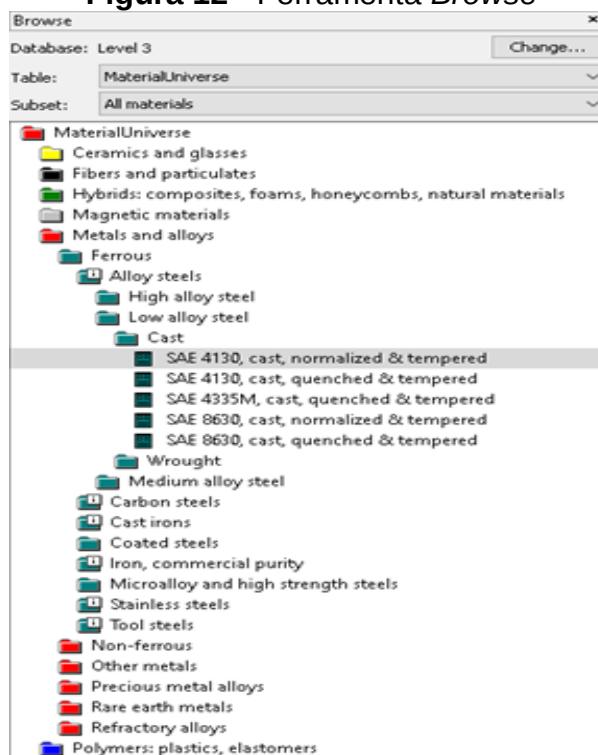


Fonte: Elaborada pelo autor

O nível 1 consiste em detalhes, incluindo nome do material, propriedades elétricas, aplicação, propriedades térmicas e propriedades mecânicas com quantidade limitada. O nível 2 inclui as informações do nível 1 e outros dados numéricos, detalhes técnicos e orientações para alterações no projeto. O nível 3 inclui os níveis 1 e 2 e acessibilidade total para a seleção da biblioteca com dados numéricos para todos os materiais, processos, referências, fornecedores, formas e seções estruturais. Existem três ferramentas principais no Ces Edupack: *Browse*, *Search* e *Chart/Select*. A ferramenta *Browse* permite explorar o banco de dados (1, 2 ou 3) detalhando os registros que são apresentados em uma estrutura hierárquica do tipo árvore. No nível superior da estrutura estão as principais famílias de materiais e no nível inferior existem materiais específicos. Na opção *MaterialUniverse* (lado direito do recurso *table*) da figura 12, os registros de material são organizados em seis famílias amplas:

cerâmica e vidros, fibras e partículas, materiais híbridos, materiais magnéticos, metais e ligas e por fim polímeros, cada família é composta de classes (ferrosos, ligas de metais preciosos, por exemplo) que podem conter subclasses (aços de liga, aço de baixa liga, aços fundido), consistindo de muitos materiais específicos (SAE 4130, por exemplo). As categorias e a hierarquia apresentadas na ferramenta *Browse* são específicas para cada opção de dados: por exemplo, ao alterar de *MaterialUniverse* para *ProcessUniverse*, os registros contêm dados dos processos de fabricação em vez de dados do material e são organizados pelo tipo: União, Modelagem e Tratamento de superfície.

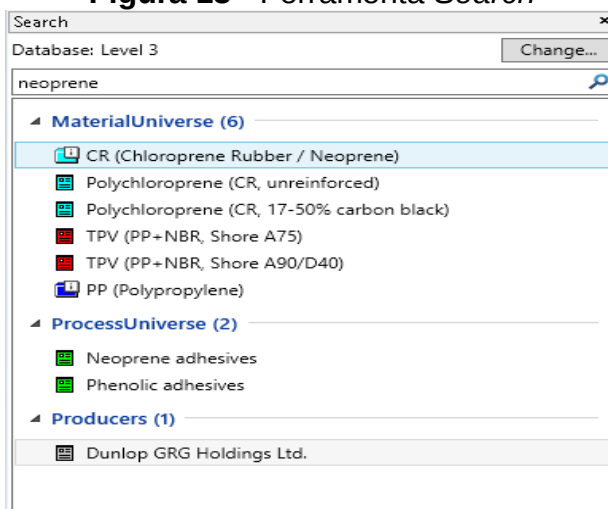
Figura 12 - Ferramenta *Browse*



Fonte: Elaborada pelo autor

Na ferramenta *Search*, os materiais ou métodos de processamento podem ser encontrados usando uma simples pesquisa por palavra-chave. Na figura 13, mostra um exemplo de consulta. Para este exemplo, no espaço destinado aos resultados, foram encontradas três opções: *MaterialUniverse*, *ProcessUniverse* e *Producers*. Em cada opção são mostrados os membros específicos relacionados ao material ou equipamento pesquisado.

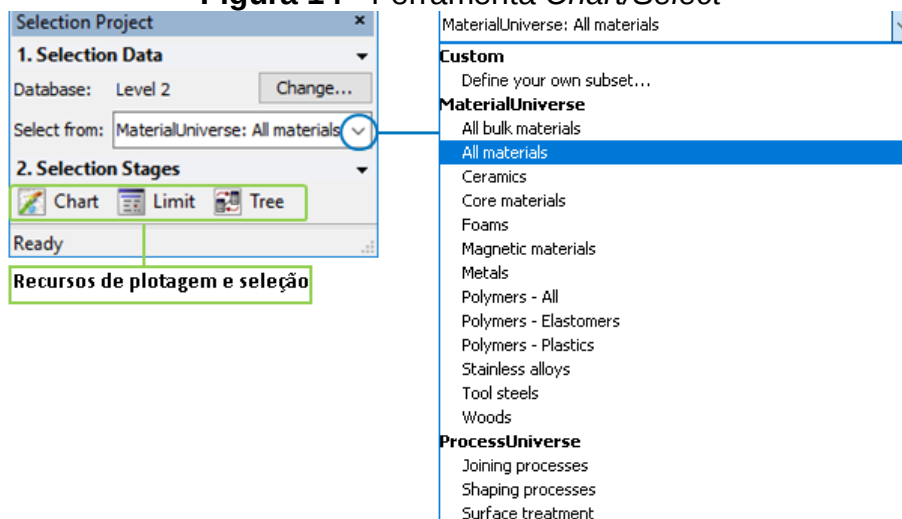
Figura 13 - Ferramenta Search



Fonte: Elaborada pelo autor

A seleção do material ocorre a partir da ferramenta conhecida como *Chart/Select*, que consiste na criação dos diagramas de barras e diagramas de balões. A figura 14 representa a interface da ferramenta, sendo caracterizado por especificar o nível do banco de dados, que é o principal fator limitante com relação à variedade de subconjuntos padrão das famílias de processos e materiais (por exemplo, Todos os materiais, Metais, Materiais magnéticos) que permitem aos usuários restringir a seleção.

Figura 14 - Ferramenta Chart/Select



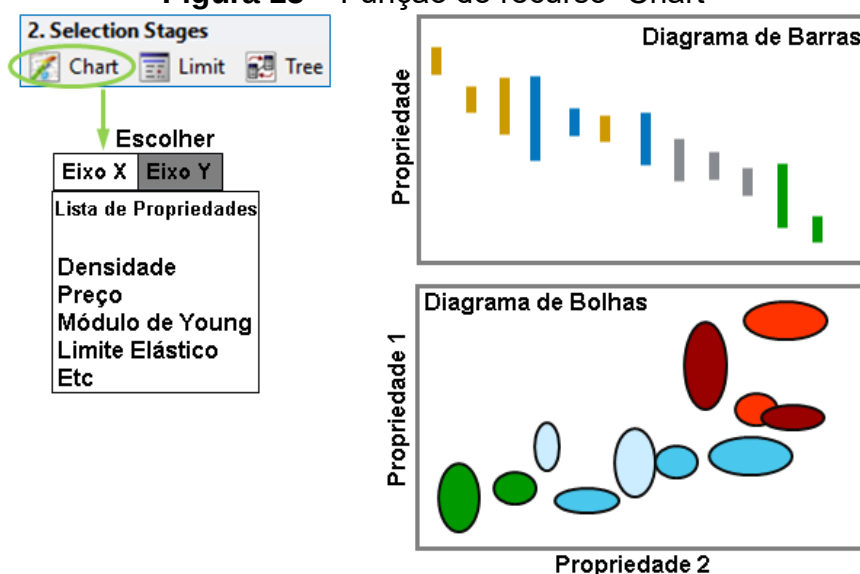
Fonte: Granta Design, adaptação do autor⁴

⁴ Disponível em: <<https://grantadesign.com/teachingresources/pptchaen19/>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

Dependendo do tipo de planejamento do trabalho de seleção, as vezes pode ser útil limitar o conteúdo do banco de dados apenas aos materiais ou processos de interesse de um projeto. Para isso, a opção *Define Your Own Subset* no recurso suspenso das famílias de materiais e processos permite escolher o subconjunto inicial de qualquer um dos bancos de dados existentes do Ces EduPack. O subconjunto é definido marcando as caixas dos materiais que se deseja incluir no subconjunto (abrir a árvore permite que materiais individuais sejam selecionados). Dessa forma, ao criar um diagrama ou realizar uma seleção, apenas esses materiais do subconjunto serão usados e caso o subconjunto for usado para criar um novo projeto, este mesmo grupo de materiais particulares será recriado pelo software quando o projeto for reaberto.

Após escolher o subconjunto de dados com o qual deseja trabalhar (*All Materials* são geralmente um bom ponto de partida), os recursos de plotagem e seleção (*Chart*, *Limit* e *Tree*) permitem realizar a seleção gráfica de materiais com base nas propriedades. Ao clicar no recurso *Chart*, uma nova janela do programa permite selecionar as propriedades que deseja exibir no eixo Y e/ou no eixo X, bem como também especificar as escalas dos eixos. Na ilustração da figura 15, os diagramas de barras podem ser criados selecionando uma propriedade tanto no eixo Y quanto no eixo X, e o diagrama de bolhas ao invés de uma, são duas propriedades simultâneas.

Figura 15 – Função do recurso “Chart”



Fonte: Granta Design, adaptação do autor⁵

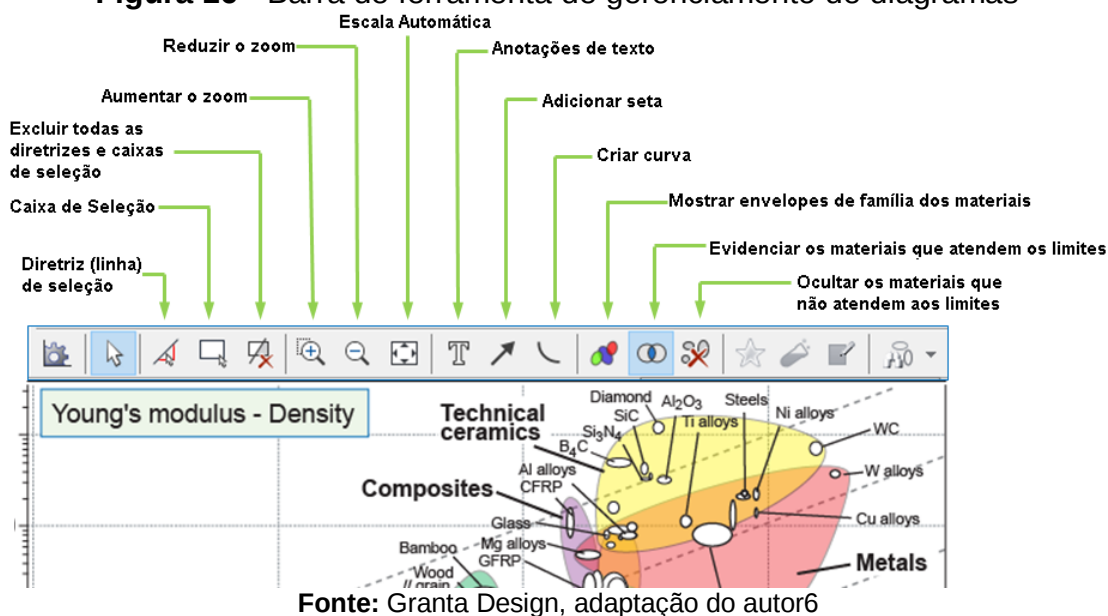
⁵ Disponível em: <<https://grantadesign.com/teachingresources/pptchaen19/>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

O recurso *Chart* também pode ser usado para plotar combinações de propriedades (ou seja, índices de material) no eixo Y e/ou X. A plotagem desses diagramas avançados é realizada na janela *Chart Stage* com a opção *Advanced*. Ainda na janela *Chart Stage*, existe uma opção chamada *Performance Index Finder*, cuja função permite que os projetistas identifiquem (e plotem) rapidamente os índices de materiais aplicáveis ao projeto.

Na ferramenta *Chart/Select*, o recurso *Limit* permite colocar restrições como valores mínimos e máximos para propriedades. Ao clicar no recurso, três opções são fornecidas: *Settings*, *Apply* e *Clear* com uma lista de propriedades logo em seguida. Nesta lista, é possível encontrar três tipos de atributos: numéricos, caracterizados por utilizarem limites numéricos como valores mínimos, máximos ou de intervalo, os atributos discretos permitem selecionar qualidades pré-definidas pelo software e os atributos lógicos são aqueles que aceitam dados verdadeiros ou falsos.

O último recurso chamado *Tree* permite filtrar registros no banco de dados dos materiais com base na relação com os outros registros dos processos de fabricação, por exemplo, com esse recurso é possível selecionar os materiais que são apenas produzidos pelo processo de moldagem por injeção.

Quando um diagrama é criado, uma barra de ferramentas de gerenciamento de diagramas (figura 16) aparece no topo. Esta barra de ferramentas fornece: Exploração do diagrama por meio da ampliação as áreas selecionadas, triagem dos melhores candidatos através da aplicação das diretrizes (linhas), curvas ou caixas de seleção, personalização do diagrama mediante a anotação de texto, a envelopes em volta das famílias de materiais, que fazem com que os materiais que não atendem a outros estágios de seleção apareçam em cinza ou desapareçam completamente.

Figura 16 - Barra de ferramenta de gerenciamento de diagramas

Apesar de não fazer parte do escopo deste trabalho, vale salientar que existem outras ferramentas que integram o programa, por exemplo, a opção conhecida como *Eco Audit*, que pode ser utilizada como sendo o ponto de partida para design de produto com consciência ecológica, pois identifica quais os parâmetros do projeto necessitam de revisão a fim de tornar o produto menos impactante ao meio ambiente. Esta ferramenta funciona como um sistema de auditoria ecológica que estima a energia usada e a quantidade de CO_2 produzida durante cinco importantes fases de um produto (material, fabricação, transporte, uso e fim da vida útil) e identifica qual fase tem a contribuição dominante, de modo a permitir uma minimização dos impactos ambientais assim como seu custo, com isso, é possível com levar em consideração a substituição de um material por outro (alternativo) no projeto sem que este modifique as exigências técnicas e econômicas dos requisitos. A outra ferramenta do programa é conhecida como *Synthesizer*, que consiste em dois tipos de modelos: modelos híbridos, para estimar o desempenho de novos materiais e estruturas; e o modelo de custo da peça, por calcular o custo de um componente com base na cadeia de material e processo. O *Synthesizer* é uma ferramenta complementar para o Ces Edupack, por isso está disponível apenas em algumas edições avançadas do programa.

⁶ Disponível em: <<https://grantadesign.com/teachingresources/pptchaen19/>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

3. METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida para a aplicação da SM de alguns componentes da equipe UFPBaja teve como base a exploração da literatura relacionada a área do universo automobilístico, mais especificamente direcionada ao sistema de suspensão, do freio e também a uma parte estrutural do protótipo. Como os carros de corrida precisam ser leves para maximizar o desempenho, segue-se que os componentes de um veículo do tipo baja devem ser os mais leves possíveis e ainda assim desempenharem suas respectivas funções de forma completamente segura. Assim, com relação ao protótipo atualmente projetado pela equipe (figura 17), foi determinado que para o escopo deste trabalho serão discutidos o disco de freio, o braço de suspensão e o assoalho, pois são exemplos de componentes relevantes para a segurança do piloto e veículo. Esta análise ocorre mediante ao principal objetivo de redução do peso do veículo, que será tratado junto às propriedades mecânicas para gerar os índices de material que devem ser expressos em função da densidade.

Para cada um dos componentes analisados, o processo de SM será feito a partir de uma relação de comparação entre as propriedades dos materiais atualmente utilizados pela equipe. O levantamento preliminar das informações pertinentes ao disco de freio, braço de suspensão e assoalho que são utilizados no protótipo da equipe ocorreu por meio de consultas e entrevistas com alguns membros da UFPBaja, e as informações numéricas das propriedades desses materiais foram obtidas através do Ces Edupack 2019, na ferramenta *Search*, onde foi aplicado o valor superior mostrado no registro do material como fator limitante das propriedades na análise de cada componente. Como foi abordado em tópicos anteriores, cada uma das etapas de SM é realizada utilizando estratégias de estreitamento cuja diminuição dos candidatos ocorrerá de forma gradativa. Na etapa de tradução, o principal critério das restrições será em razão das propriedades mecânicas em que os componentes analisados estão sujeitos. Em seguida, de posse dos índices de material e com base no software Ces Edupack 2019 os DPM são criados para a etapa de triagem e eliminação, que por sua vez, após a aplicação das restrições irá fornecer a dimensão dos materiais disponíveis para a seleção. Na etapa de classificação, o uso da linha de diretriz de seleção (ou linha-guia) é fundamental para organizar os materiais mais promissores, resultando deste modo em uma lista restrita de possíveis candidatos

para a etapa de documentação, que considera os usos típicos, os setores de aplicações, os pontos fortes e fracos ou outras informações, sendo então em função disso, analisados para chegar à escolha final do material alternativo que atenda aos requisitos do projeto.

O levantamento dos índices de material, das informações da etapa de documentação e das propriedades mecânicas que atuam nos componentes analisados será feito por intermédio de uma literatura técnica proveniente de pesquisa bibliográfica em livros, teses e dissertações, tabelas e catálogos que tratam da seleção de materiais, haverá também pesquisas em caráter informativo ao RATBSB 2019 com relação as recomendações de um dos componentes.

Figura 17 - Protótipo P09 Indominável



Fonte: Arquivo autor

3.1. Disco de Freio

Os componentes mais importantes de um freio a disco consistem em um disco maciço, a pinça de freio e as pastilhas. Nogueira (2017) ressalta que o freio a disco é empregado pela grande maioria das equipes de competição Baja SAE e

também em protótipos de veículo em outras categorias de competição, devido a fatores de custo, massa, manutenção, ventilação, suportam maiores temperaturas, são compactos quanto ao espaço para sua instalação, possuem maiores possibilidades de modificação em sua geometria, além de terem métodos de fabricação acessíveis e personalizáveis por cada equipe.

De acordo com Macnaughton (1998), o esforço desempenhado por um freio a disco juntamente com o calor que ele deve dissipar no decorrer da frenagem são diretamente proporcionais ao peso e a velocidade do veículo no momento em que o freio é acionado, dessa forma, a análise de novos materiais para este componente ainda na fase do projeto é importante para alcançar o desempenho ideal de frenagem, com isso, uma das partes principais do sistema de freio automotivo é o disco de freio, também denominado de rotor, este componente desempenha um papel importante quando se deseja parar efetivamente o veículo.

Segundo Brezolin (2007), a atividade de pressionar as pastilhas de freio contra um disco por meio de ao menos um pistão contido na estrutura da pinça de freio produz um atrito que fica responsável por reduzir a velocidade de rotação do disco que, durante o processo de frenagem, transfere a energia cinética proveniente do veículo em movimento para os discos de freio na forma de energia térmica (calor). Sendo assim, conforme o mesmo autor, a transmissão de uma elevada força mecânica durante a frenagem é um fator muito importantes no desempenho do disco de freio, pois, quando as pastilhas de freio são acionadas ocorre a ação de esforços mecânicos cíclicos que atuam no disco de freio, conseqüentemente, a resistência a fadiga do material é uma propriedade importante que deve ser levada em consideração. Com relação à energia térmica durante a frenagem, Brezolin (2007) destaca que o disco do freio deve ter elevada condutividade térmica, visto que esta característica garante uma dissipação de calor mais rápida e ajuda a evitar distorções térmicas do rotor. Conforme Kao (2000), uma segunda característica que pode contribuir para os problemas de distorções térmicas do rotor é o coeficiente de dilatação térmica, pois está relacionado com os fenômenos de DTV (variação da espessura do disco de freio) e *hot spotting* (regiões térmicas concentradas), então torna-se interessante que o material do disco de freio tenha o menor valor possível para o coeficiente de dilatação térmica. Com relação às tensões que o disco de freio é submetido, além da resistência a fadiga pode-se salientar a resistência à compressão como outra propriedade indispensável que deve ser levada em

consideração na seleção do material, pois, Brezolin (2007) ressaltou através do trabalho de Abendroth (2000) que os carregamentos alternados resultam em trincas térmicas no disco de freio, tendo como fator determinante o momento em que o limite de resistência à compressão do material do disco é superado.

Portanto, conforme o que foi exposto acima, o processo de seleção do material que será tratado neste trabalho para ser utilizado no rotor deve satisfazer características e propriedades específicas evidenciadas pelo material durante a operação do componente, tais como resistência à compressão, condutividade térmica, coeficiente de dilatação térmica e fadiga.

3.2. Braço de Suspensão

De acordo com Almeida Junior (2007), a suspensão automotiva é caracterizada por um conjunto de componentes que são projetados com a responsabilidade de absorver as irregularidades do solo como também garantir a estabilidade e por consequência à segurança do veículo, além disso, a suspensão está relacionada ao posicionamento das rodas de maneira favorável a partir de uma resposta rápida aos comandos do piloto, auxiliando assim, na manobrabilidade. Portanto, o projeto correto da suspensão em linhas gerais não reflete apenas na segurança do veículo e do piloto, como também se torna um fator significativo nos resultados das competições.

O tipo mais comum de suspensão empregada no eixo dianteiro por muitas equipes de competição Baja SAE é conhecida pelo nome de, segundo Almeida (2012), *double wishbone* ou *double A arm*, cuja principal característica é ser composta por dois braços ou bandejas em forma de “A”, um superior e outro inferior, dessa forma, a escolha desse tipo de suspensão possibilita uma maior autonomia na aplicação dos ajustes de cambagem, permite o controle dos parâmetros cinemáticos e oferece maior adequação do sistema de direção. Tomando como base a natureza desses esforços mecânicos, o comportamento adotado na análise de seleção do material assumirá as características de um tirante sob tração.

Conforme Deshmukh (2017), o procedimento de projeto dos braços de suspensão inclui em termos de material a combinação de critérios de carregamento que não devem exceder seu limite elástico e também apresentar um elevado Módulo de Young. Para isso, os IM para a seleção de material devem ser determinados a partir das propriedades de resistência ao escoamento e da rigidez.

3.3. Assoalho

Durante a competição, inúmeros obstáculos são considerados devido à condição de a pista ter como característica o terreno acidentado, como por exemplo, troncos de árvores e bambus, rochas, lama, rampas, valetas, entrada de água dentro do habitáculo, poças, buracos, entre outros. Dessa forma, o assoalho do veículo torna-se um dos componentes de grande importância visto que contribui para a segurança do piloto, segundo o regulamento RATBSB 2019, o assoalho deve cobrir todo o comprimento do habitáculo de forma que o piloto não mantenha contato com o chão, bem como que previna a entrada de detritos e objetos externos ao habitáculo do piloto independentemente dos obstáculos da pista. Ainda segundo o mesmo regulamento, o assoalho deve ser projetado de metal, fibra de vidro, plástico ou materiais similares.

Portanto, o processo de seleção do material tratado neste trabalho para ser utilizado no assoalho levou em consideração o comportamento do componente que foi analisado como sendo um elemento estrutural denominado painel, que deve suportar com a menor massa possível momentos de flexão sem que haja deformação.

4. RESULTADOS

4.1. Disco de Freio

Aplicando então as informações discutidas anteriormente, tem-se que o requisito do projeto está em fazer a seleção de um material alternativo para o disco de freio do protótipo da equipe UFPBaja visando a redução da massa do componente. As restrições funcionais compreendem um material que propicie um elevado limite de resistência à compressão para evitar o surgimento de trincas térmicas devido aos carregamentos alternados que o disco de freio está sujeito, o menor valor possível para o coeficiente de dilatação térmica para evitar maiores complicações envolvendo os fenômenos de DTV e *hot spotting*. Como o disco de freio está submetido a repetidos ciclos de frenagem, o material também deve proporcionar uma excelente resistência à fadiga.

Para as restrições absolutas, o material deve conceder uma boa condutividade térmica para que a dissipação de calor se torne mais rápida e ajude a proteger o rotor de distorções térmicas, a equipe utiliza atualmente o material aço inoxidável SAE 304 para o disco de freio, então como o objetivo é na diminuição da massa do projeto, tem-se também para a restrição absoluta do processo de SM que a densidade limite não deve ser maior do que a do aço inoxidável SAE 304 e por fim, para a temperatura de trabalho um valor mínimo a partir de 350°C (Oder, 2009). O objetivo do projeto está caracterizado na necessidade de o material ter a menor massa possível e a variável livre está na escolha do material. Assim, a etapa de tradução desse caso está exemplificada no quadro 3

Quadro 3 – Tradução dos requisitos de projeto para o disco de freio leve

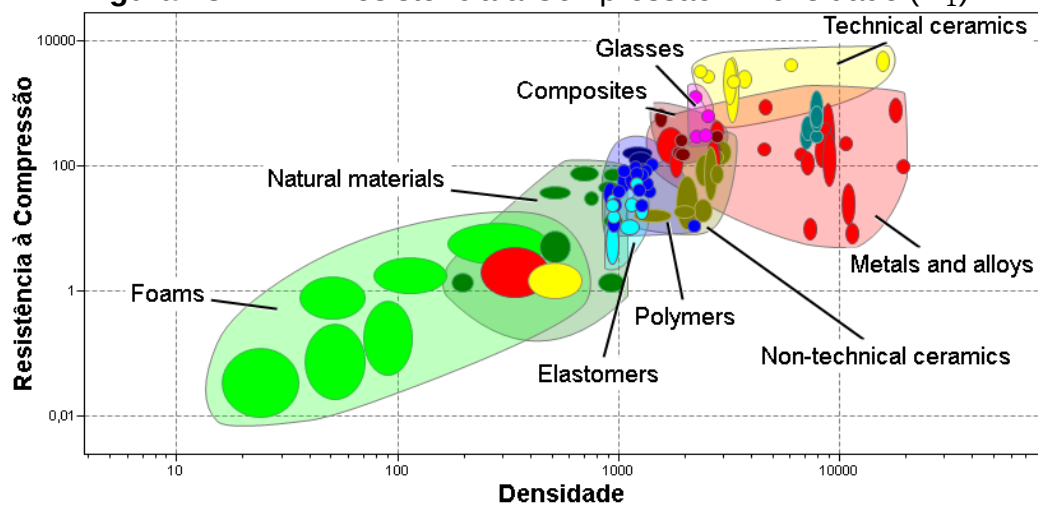
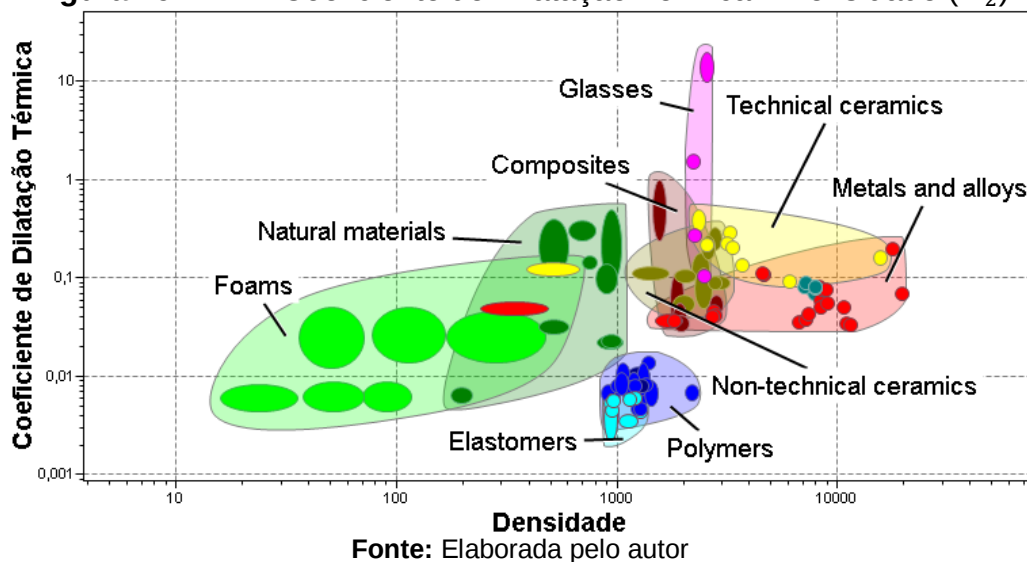
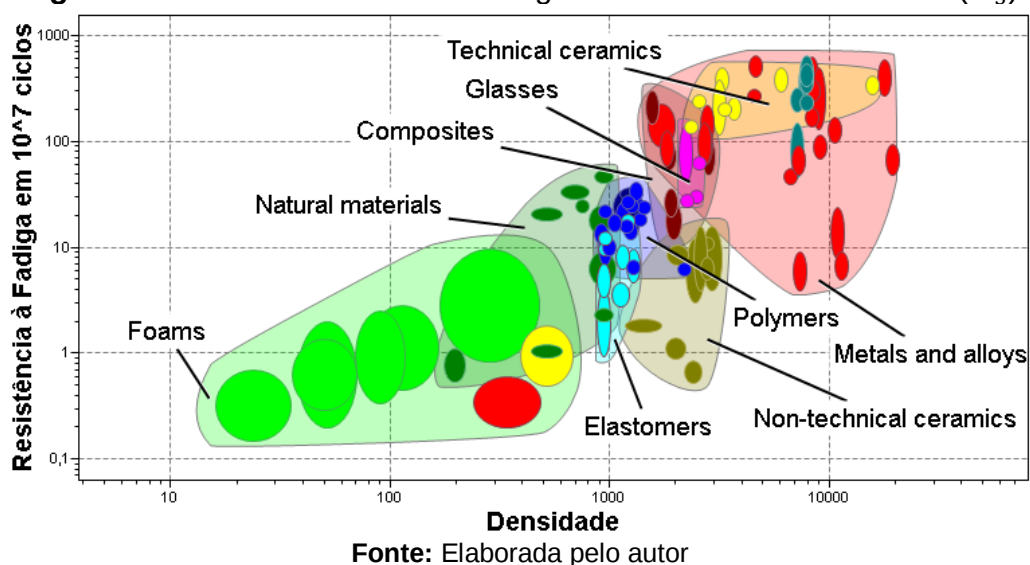
Tradução	Detalhamento
Função	Capacidade de dissipar o calor gerado da energia cinética do veículo por meio da fricção.
Restrições Funcionais	Alta Resistência à Compressão; Baixo Coeficiente de Dilatação Térmica; Alta Resistência à Fadiga;
Restrições Absolutas	$\rho < 7.870 \frac{Kg}{m^3}$ Temperatura de Trabalho > 350°C Bom Condutor Térmico
Objetivo	Minimizar a massa.
Variável livre	Escolha do material.

Fonte: Elaborado pelo autor

Como discutido acima, para a seleção de materiais do disco de freio de acordo com as características térmicas e estruturais os seguintes IM foram utilizados nos DPM:

$$M_1 = \frac{\sigma_c}{\rho}, M_2 = \frac{1/\alpha}{\rho}, M_3 = \frac{S_e}{\rho}$$

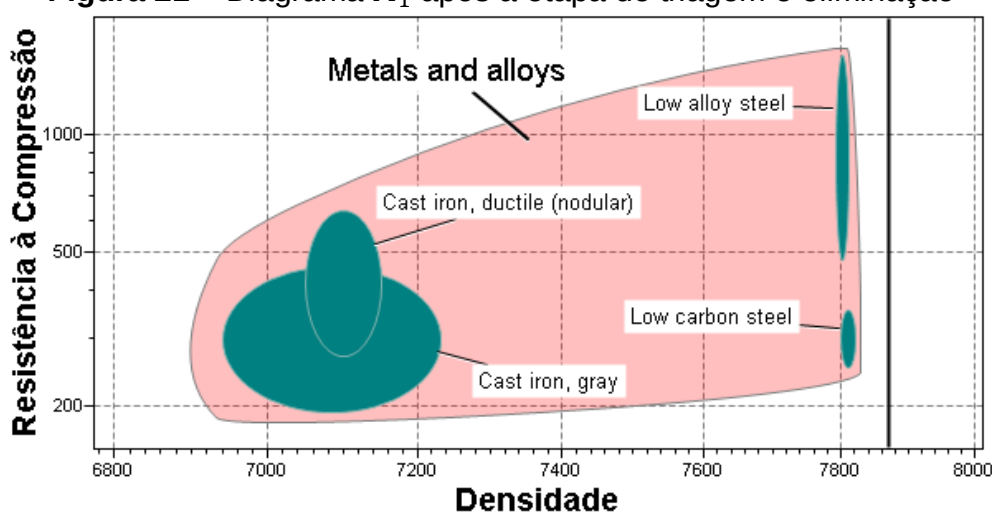
Inicialmente, utilizando o nível 2 do Ces Edupack cada um dos DPM foram criados estabelecendo qual propriedade seria o eixo horizontal e qual propriedade seria o eixo vertical. Desse modo os diagramas contendo as propriedades de resistência à compressão, coeficiente de dilatação térmica e resistência à fadiga foram plotados em relação à densidade. Por se tratar de diagramas do tipo bolha e também como até esse momento não foi aplicado nenhuma restrição ou limite, no programa propriamente dito, os balões que delimitam as famílias dos materiais ficam coloridos indicando que todas as opções de materiais foram consideradas na análise, conforme as figuras abaixo:

Figura 18 - DPM Resistência à Compressão x Densidade (M_1)**Figura 19 - DPM Coeficiente de Dilatação Térmica x Densidade (M_2)****Figura 20 - DPM Resistência à Fadiga em 10^7 ciclos x Densidade (M_3)**

Para a etapa de triagem e eliminação as restrições absolutas do quadro 3 foram aplicadas em cada um dos DPM das figuras acima que consideram todas as famílias de materiais disponíveis no banco de dados do nível 2 do software, algo em torno de 100 materiais disponíveis em sua totalidade para a escolha. Inicialmente, o uso da restrição absoluta da densidade ocorreu por meio da plotagem de uma reta vertical correspondente ao valor mínimo de $7870 \frac{Kg}{m^3}$, fazendo com que a análise de seleção considerasse todos os materiais localizados à esquerda enquanto que todos os materiais localizados à direita dessa reta fossem descartados porque são os que apresentaram uma densidade mais alta do que a solicitada pela restrição do disco e por consequentemente não atenderem o objetivo do projeto.

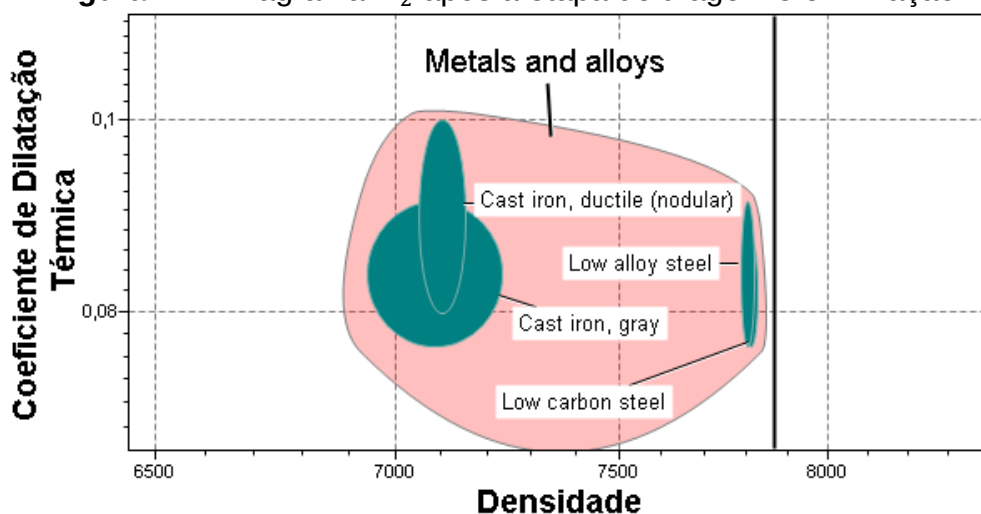
Em seguida, com relação ao uso das restrições absolutas do valor de temperatura de trabalho e o atributo discreto de bom condutor térmico, ambas se deram a partir da opção *Thermal properties* proveniente da ferramenta *Limit*, oferecendo assim como resultado em todos os DPM o número de 10 possíveis candidatos pertencentes às famílias dos metais, das cerâmicas técnicas e dos compósitos. Considerando apenas os metais e ligas como forma de diminuir ainda mais as opções de escolha, o número de possíveis candidatos que atendem aos requisitos do projeto (quadro 3) passou a ser de 4 materiais conforme identificados nas figuras abaixo.

Figura 21 – Diagrama M_1 após a etapa de triagem e eliminação



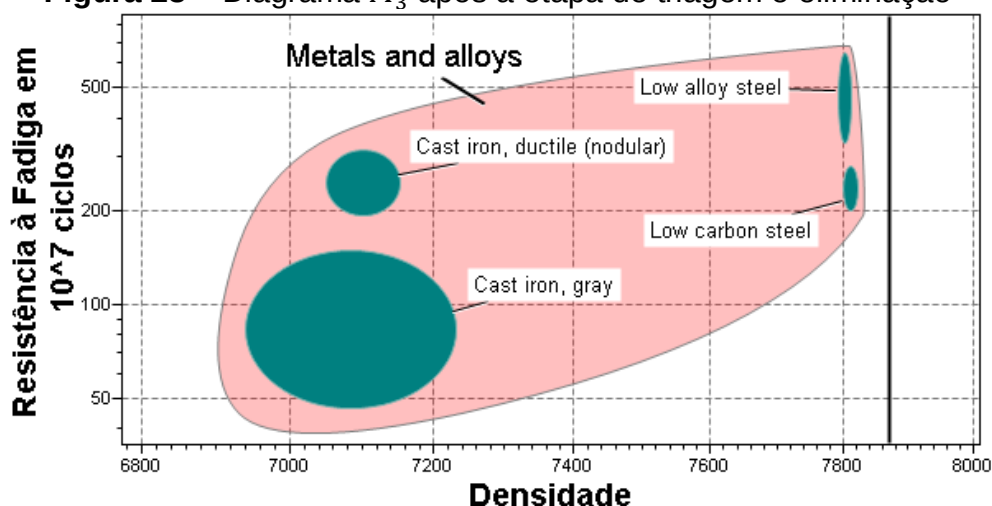
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 22 – Diagrama M_2 após a etapa de triagem e eliminação



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 23 – Diagrama M_3 após a etapa de triagem e eliminação



Fonte: Elaborada pelo autor

Feita essa triagem que resultou em 4 materiais para cada uma das propriedades (Resistência à Compressão, Coeficiente de Dilatação Térmica e Resistência à Fadiga) em relação à densidade, a realização da etapa de classificação fez uso da linha de diretriz de seleção (ou linha-guia). Como o objetivo do projeto é o de minimizar a massa do disco de freio, procurou-se para cada um dos materiais triados seus respectivos valores dos índices de material através do uso da linha de diretriz de seleção com inclinação 1, dessa forma, para cada um dos DPM foram selecionados os materiais que apresentaram os maiores índices classificados conforme no quadro 4. Para o índice M_1 , os materiais com maiores valores são o Aço de Baixa Liga e o Ferro Fundido Nodular, para o índice M_2 são o Ferro Fundido

Nodular e o Ferro Fundido Cinzento e para o índice M_3 são o Aço de Baixa Liga e o Ferro Fundido Nodular.

Quadro 4 - Classificação dos materiais triados para o disco de freio leve

Material	M_1	M_2	M_3
Ferro Fundido Nodular	0,0588	$1,26 \times 10^{-5}$	0,035
Ferro Fundido Cinzento	0,042	$1,18 \times 10^{-5}$	0,0118
Aço de Baixa Liga	0,113	$1,07 \times 10^{-5}$	0,0598
Aço de Baixo Carbono	0,0385	$1,05 \times 10^{-5}$	0,0304

Fonte: Elaborado pelo autor

Na última etapa da seleção do material para o disco de freio, como determinado na fase de classificação, os candidatos com os maiores valores de M_1 , M_2 e M_3 são os que maximizam o desempenho do projeto de acordo com os requisitos (restrições e objetivo), por isso, foram selecionados como os mais apropriados para serem submetidos à etapa de documentação, tratada no quadro 5.

Quadro 5 - Documentação dos melhores candidatos para o disco de freio leve

Material	Documentação
Ferro Fundido Nodular	Engrenagens e pinhões, virabrequins, juntas universais, máquinas de trabalho pesado, válvulas, componentes sujeitos a desgaste e impacto em geral, ferragens para setor elétrico.
Aço de Baixa Liga	Molas, ferramentas, rolamentos de esferas, rolos, virabrequins, engrenagens, bielas, facas e tesouras, vasos de pressão.
Ferro Fundido Cinzento	Rolamentos, eixo de comando de válvulas, camisas de cilindros, anéis de pistão, peças estruturais de máquinas-ferramenta, blocos de motores, engrenagens, virabrequins, caixas de engrenagens para serviços pesados, juntas de tubos, carcaças de bombas, componentes em trituradores de rochas.

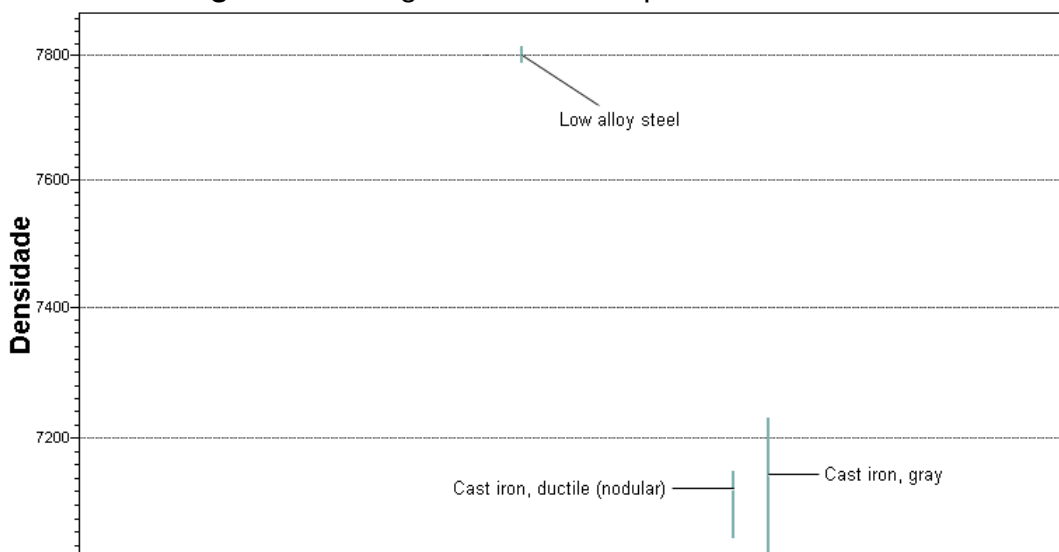
Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando a parte da aplicabilidade, os três candidatos apresentam uma relevância de utilização no setor automotivo, porém, como todos os materiais nessa etapa de seleção atendem aos requisitos e como também só existe um objetivo (minimizar a massa), optou-se por criar um diagrama de barras da densidade para

escolher dentre os submetidos à etapa de documentação aquele que possuir a menor densidade média. O diagrama de barras está exibido na figura 24, tendo o material de menor densidade média (ferro fundido cinzento $\rho = 7.085 \frac{Kg}{m^3}$) um histórico de utilização para discos de freios, portanto, é selecionado então esse material para o projeto do disco de freio da equipe UFPBaja.

O ferro fundido cinzento foi o material escolhido para o projeto de massa mínima do disco do freio da equipe UFPBaja a partir do nível 2 do Ces Edupack, que é suficiente para propor uma seleção alternativa, porém, para uma seleção avançada de material com mais opções de escolha o banco de dados nível 3 do software é o mais recomendado, nesse caso do disco de freio, a seleção pode ser realizada a partir do material atualmente usado pela equipe (aço inoxidável SAE 304) ou do material proposto nesta análise (ferro fundido cinzento) considerando os limites das propriedades mecânicas e térmicas como as qualidades mínimas desejáveis.

Figura 24 - Diagrama de barras para a densidade



Fonte: Elaborada pelo autor

4.2. Braço de Suspensão

A análise adotada para o procedimento sistemático de seleção do conjunto superior e inferior do braço de suspensão da equipe UFPBaja levou em consideração o comportamento do componente que assumiu as características de um tirante sob tração. Na etapa de tradução, as restrições funcionais e absolutas compreendem respectivamente a rigidez, a resistência ao escoamento e as informações dos materiais atualmente utilizados pela equipe. Na etapa de triagem e eliminação foram aplicados os valores das propriedades de densidade, do módulo de Young e da tensão de escoamento desses materiais que compõem o braço de suspensão atual. Para realizar a etapa de classificação foi utilizada a linha de diretriz de seleção e por fim, na etapa de documentação foram citadas as aplicações típicas dos candidatos mais promissores.

Com relação ao material do componente, a equipe faz uso do mesmo tipo com diferentes composições, sendo utilizado na bandeja superior o aço de baixa liga SAE 4130 e na bandeja inferior o aço ao carbono SAE 1020, por isso, como se trata de um mesmo componente composto por dois materiais específicos oriundos da classificação aço, optou-se por utilizar para a seleção um banco de dados com informações mais abrangentes e que forneça também mais opções de escolha, dessa forma, para atender estas condições o nível 3 do Ces Edupack foi empregado.

As informações da etapa de tradução do projeto de uma bandeja superior leve estão sendo mostradas no quadro 6. Tratando a função do componente como um tirante de união, é necessário que o seu material possua uma elevada rigidez e também uma boa resistência ao escoamento. Com relação aos valores das restrições absolutas, a densidade, o módulo de Young e a tensão de escoamento foram obtidos a partir do aço de baixa liga SAE 4130 na ferramenta *Search* do Ces Edupack. O objetivo do projeto está caracterizado na necessidade do material ter a menor massa possível e a variável livre está na escolha do material.

Quadro 6 - Tradução dos requisitos do projeto de uma bandeja superior leve

Tradução	Detalhamento
Função	Tirante de união
Restrições Funcionais	Alta Resistência ao Escoamento; Elevada Rigidez;
Restrições Absolutas	$\rho < 7.900 \frac{Kg}{m^3}$ $E > 216 \text{ GPa}$ $\sigma_e > 400 \text{ MPa}$
Objetivo	Minimizar a massa.
Variável livre	Escolha do material.

Fonte: Elaborado pelo autor

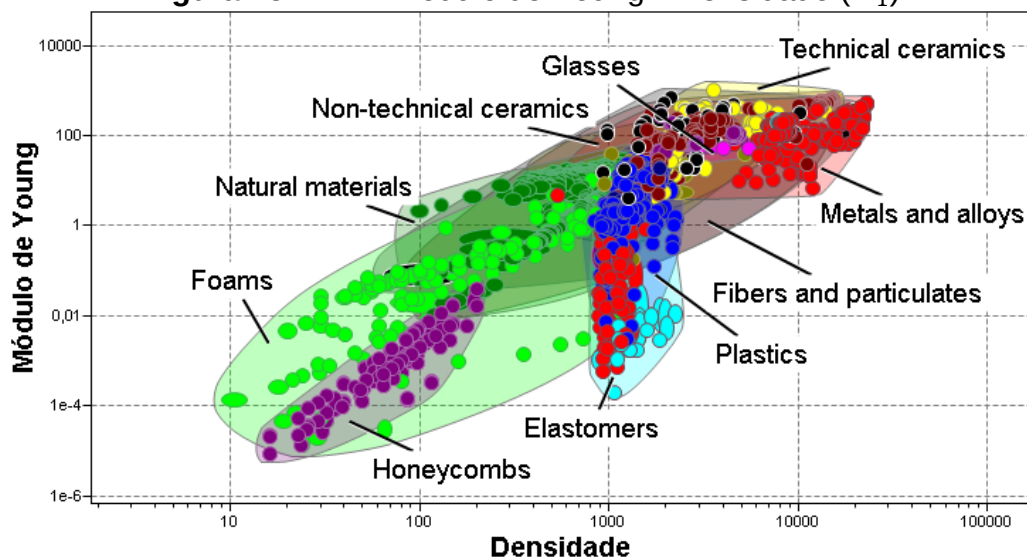
Como discutido acima, para a seleção de materiais do braço de suspensão de acordo com as características estruturais dos esforços mecânicos de rigidez e resistência ao escoamento, os seguintes IM foram utilizados nos DPM:

$$M_1 = \frac{E}{\rho}, M_2 = \frac{\sigma_e}{\rho}$$

Como mencionado anteriormente, a criação dos DPM nas figuras abaixo se deu a partir do nível 3 do software, cada um dos diagramas foi plotado contendo as propriedades de módulo de Young e a tensão de escoamento em relação à densidade. Para o diagrama M_1 (Módulo de Young x Densidade) e M_2 (Tensão de escoamento x Densidade) o programa gerou os seguintes tipos de materiais: Vidros e cerâmicas (técnicas e não técnicas), fibras e particulados (fibras cerâmicas, metálicas, poliméricas e naturais), híbridos (compósitos, *honeycomb structure*, espumas e materiais naturais), materiais magnéticos, metais e ligas (ferrosos, não ferrosos, metais preciosos, metais refratários, metais de terras raras e outros metais) e polímeros (plásticos e elastômeros). Nos dois DPM, os metais e ligas, cerâmicas técnicas, compósitos, fibras e particulados são exemplos de materiais que estão localizados na parte superior direita dos diagramas e por isso apresentam uma elevada rigidez e resistência ao escoamento, porém, são pesados. Enquanto isso, as espumas, os materiais naturais, os plásticos e elastômeros são exemplos de materiais que se concentram no lado inferior esquerdo dos diagramas e devido a isso são leves por possuírem uma baixa densidade, porém, são flexíveis e fracos quando

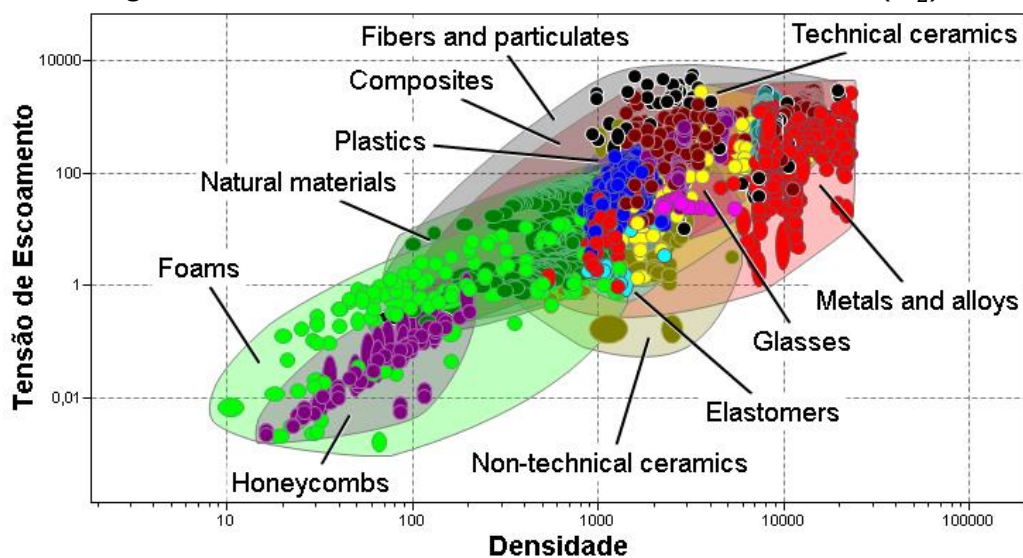
comparados aos outros materiais

Figura 25 - DPM Módulo de Young x Densidade (M_1)



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 26 - DPM Tensão de Escoamento x Densidade (M_2)



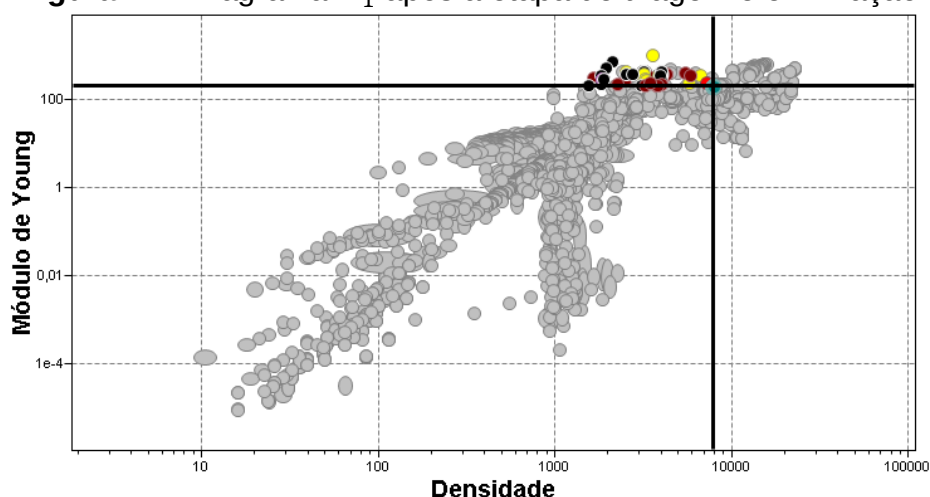
Fonte: Elaborada pelo autor

A quantidade disponível de materiais no banco de dados nível 3 ultrapassa o número de 3.800 materiais, por isso, para a realização da etapa de triagem e eliminação as restrições absolutas do quadro 6 foram aplicadas em cada um dos DPM das figuras acima. No diagrama M_1 , o uso da restrição absoluta da densidade, do módulo de Young e da tensão de escoamento ocorreu respectivamente por meio da plotagem de uma reta vertical correspondente ao valor mínimo de $7.900 \frac{Kg}{m^3}$, por meio

da plotagem de uma reta horizontal correspondente ao valor máximo de 216 GPa e através da opção *Mechanical properties* proveniente da ferramenta *Limit*. Com relação ao diagrama M_2 , a aplicação da restrição absoluta da densidade, do módulo de Young e da tensão de escoamento ocorreu de forma parecida ao diagrama anterior, o diferencial está na plotagem da reta horizontal, que agora assume o valor máximo da tensão de escoamento de 400 MPa.

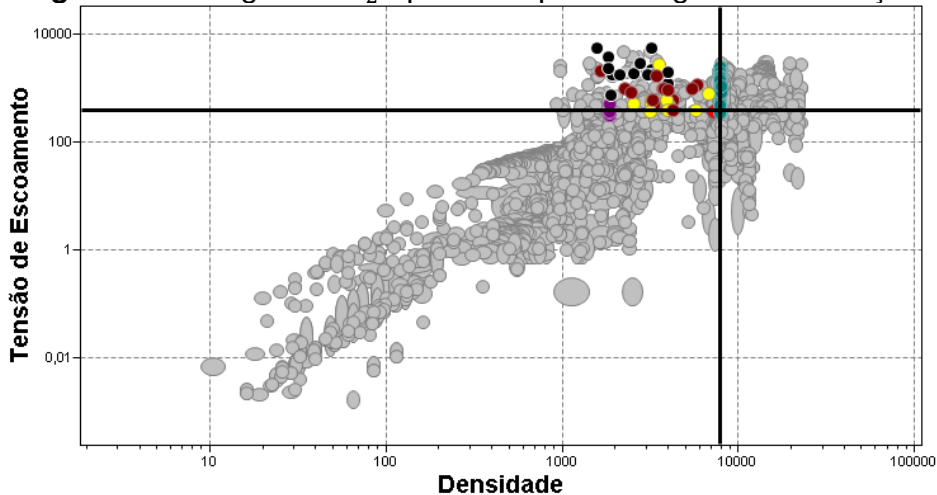
Com isso, nessa etapa de triagem e eliminação no diagrama M_1 os materiais resultantes que atendem os requisitos do projeto compreendem 139 candidatos distribuídos entre os compósitos, as fibras e particulados, as cerâmicas técnicas e os metais e ligas. Para o diagrama M_2 , os materiais compreendem 189 candidatos divididos entre os mesmos tipos de materiais do diagrama M_1 .

Figura 27 - Diagrama M_1 após a etapa de triagem e eliminação



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 - Diagrama M_2 após a etapa de triagem e eliminação



Fonte: Elaborada pelo autor

Para realizar a etapa de classificação, a utilização da linha de diretriz de seleção com inclinação 1 se fez necessária. Dentre os candidatos determinados na etapa anterior, procurou-se para as classes selecionadas de materiais aqueles que tivessem os maiores valores dos índices de material.

No diagrama M_1 , para as fibras e particulados o material que se destacou por apresentar o maior índice foi a Fibra de Carbono, para a cerâmica técnica o Diamante foi o material com o maior índice, para os compósitos de matriz metálica os materiais selecionados foram as ligas de Magnésio reforçado com Fibra de Boro, Alumínio reforçado com fibra de Carbono, Alumínio reforçado com Al_2O_3 e Titânio reforçado com fibra de SiC, para os compósitos de matriz polimérica o Éster de Cianato reforçado com Fibra de Carbono, e por fim entre os metais e ligas o Berílio, Cromo e a liga Níquel-Cromo obtiveram os maiores valores do índice. Analisando estas opções, é possível descartar de antemão alguns materiais, tais como o Diamante, o Berílio, Cromo e a liga Níquel-Cromo, pois são inviáveis para o projeto devido a fatores que envolvem a viabilidade, aplicação e a nocividade. Com isso, as outras opções de materiais classificados em ordem decrescente de IM estão representadas no quadro 7.

Quadro 7 – Materiais classificados do diagrama M_1 para a bandeja superior leve

Material	M_1
Fibra de Carbono	0,36
Éster de Cianato reforçado com Fibra de Carbono	0,204
Magnésio reforçado com Fibra de Boro	0,117
Alumínio reforçado com Fibra de Carbono	0,109
Alumínio reforçado com Al_2O_3	0,0738
Titânio reforçado com fibra de SiC	0,0622

Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação ao diagrama M_2 , a análise considerou que a fibra de Zylon foi o material com o maior índice para a classe de fibras e particulados, em seguida o Éster de Cianato reforçado com Fibra de Carbono foi o material selecionado dentre os compósitos de matriz polimérica, para a cerâmica técnica o Diamante foi o material com o maior índice, para os compósitos de matriz metálica o Alumínio reforçado com Al_2O_3 , Alumínio reforçado com Fibra de Carbono, Magnésio reforçado com Fibra de Boro e Titânio reforçado com fibra de Borosilicatos (fibra de Boro revestida de SiC) foram os materiais com maiores destaque e por fim entre os metais e ligas o Aço

ferramenta ao Molibdênio para altas velocidades obteve o maior valor do índice. Para a classificação, o Diamante foi novamente descartado na análise juntamente com o Aço ferramenta ao Molibdênio para altas velocidades, pois, além desse material ter apresentado o menor índice entre os materiais da análise, a sua aplicação está mais apropriada para a área da usinagem. Dessa forma, as outras opções de materiais restantes foram consideradas em ordem decrescente de IM para a classificação conforme o quadro 8.

Quadro 8 – Materiais classificados do diagrama M_2 para a bandeja superior leve

Material	M_2
Fibra de Zylon	3,70
Éster de Cianato reforçado com Fibra de Carbono	1,33
Alumínio reforçado com Al_2O_3	0,504
Alumínio reforçado com Fibra de Carbono	0,466
Magnésio reforçado com Fibra de Boro	0,359
Titânio reforçado com fibra de Borosilicatos	0,285

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, as fibras e particulados, os compósitos metálicos e os compósitos poliméricos compreendem os tipos de materiais classificados tanto no diagrama M_1 quanto no diagrama M_2 para o projeto de uma bandeja superior leve do braço de suspensão. Porém, é importante ressaltar que para a etapa de documentação a fibra de carbono e a fibra de Zylon por si só não foram levadas em consideração, pois quando isolados esses materiais não são apropriados para uso, precisando ser combinado com outro material denominado de matriz, é o que ocorre no caso dos compósitos. Os compósitos são formados por uma estrutura de reforço (fibra de carbono, fibra de vidro, fibra de boro, etc) inserida em uma matriz (metálica, polimérica, cerâmica, entre outras), por isso, os materiais oriundos dessas classes foram selecionados como os mais apropriados para serem submetidos à etapa de documentação, tratada no quadro abaixo.

Quadro 9 - Documentação dos melhores candidatos para a bandeja superior leve

Material	Documentação
PMC	Os PMC possuem como matriz as resinas poliméricas e como estrutura de reforço as fibras. As resinas (plásticos reforçados) mais utilizadas são os poliésteres, ésteres vinílicos, epóxis, poli-imidas ou termoplásticas. As estruturas de reforços, os mais usados são as fibras de Carbono, fibras de Vidro, Al_2O_3 , fibras de aramida (Kevlar, Nylon, etc), fibras de Boro, entre outras. Os PMCs são rijos, fortes e leves, por isso, os reforços (fibras) são empregados em muitas aplicações que necessitam da combinação de rigidez, alta resistência e baixo peso, como por exemplo, em estruturas mecânicas no setor aeroespacial, automotivo e esportivo.
MMC	Os MMC possuem, por exemplo, as ligas de Alumínio, Magnésio, Titânio ou Cobre como matriz. As fibras mais utilizadas são as de Carbono, SiC, Boro, Al_2O_3 , Borosilicatos (fibra de Boro revestida de SiC), entre outras. As fibras MMC melhoram a rigidez específica, a resistência específica, a resistência à abrasão, a resistência à fluência, a condutividade térmica e a estabilidade dimensional. De modo geral, esses materiais são empregados em eixos propulsores, em barras estabilizadoras extrudadas e em componentes forjados da suspensão e da transmissão. Devido à leveza, a resistência ao desgaste e a distorção térmica, o Alumínio reforçado com Al_2O_3 , por exemplo, foi introduzido na fabricação de pistões de automóveis.

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, analisando a etapa de documentação é possível concluir que os PMC e MMC podem ser opções viáveis para serem utilizados como substitutos dos materiais atualmente utilizados (Aço) na bandeja superior do braço de suspensão da equipe UFPBaja, porém, dentre o grupo de compósitos a seleção optou pelos de matrizes metálicas, pois, possuem mais aplicações no setor automotivo, sendo por exemplo, a liga de Alumínio reforçado com Al_2O_3 um ótimo candidato de material que pode ser empregado na fabricação da bandeja superior do protótipo.

A respeito da bandeja inferior do braço de suspensão para as etapas de seleção do material, todo este procedimento realizado anteriormente foi repetido, só que tomando como base agora os dados do aço ao carbono SAE 1020. Com isso, o resultado final da análise também teve como parecer ser favorável à utilização dos compósitos de matriz metálica como ótimos candidatos para uma bandeja inferior que seja leve e ao mesmo tempo consiga desempenhar suas respectivas funções de forma segura.

4.3. Assoalho

O requisito do projeto está em fazer a seleção de um material alternativo para o assoalho do protótipo da equipe UFPBaja visando a redução da massa do componente. O comportamento adotado para a seleção de material do assoalho foi a de um painel, caracterizado por ser uma placa plana, como um tampo de uma mesa. A restrição funcional compreende um material que propicie uma elevada rigidez devido ao carregamento de flexão sofrido pelo componente, ou seja, a restrição funcional de rigidez requer que o assoalho não sofra deflexão. Para isso, a propriedade explorada será o módulo de Young, quanto maior esse módulo mais rígido é o material. Para as restrições absolutas, como o requisito do projeto é um material que forneça uma elevada rigidez com a menor massa possível, foi levando em consideração os valores limites da densidade e do módulo de Young do Alumínio, pois é o material utilizado atualmente pela equipe. O objetivo do projeto está caracterizado na necessidade do material ter a menor massa e a variável livre está na escolha do material. Assim, a etapa de tradução desse caso está exemplificada no quadro 10.

Quadro 10 - Tradução dos requisitos de projeto para o assoalho leve

Tradução	Detalhamento
Função	Painel
Restrição Funcional	Elevada rigidez
Restrições Absolutas	$\rho < 2.770 \frac{Kg}{m^3}$ $E > 76 GPa$
Objetivo	Minimizar a massa.
Variável livre	Escolha do material.

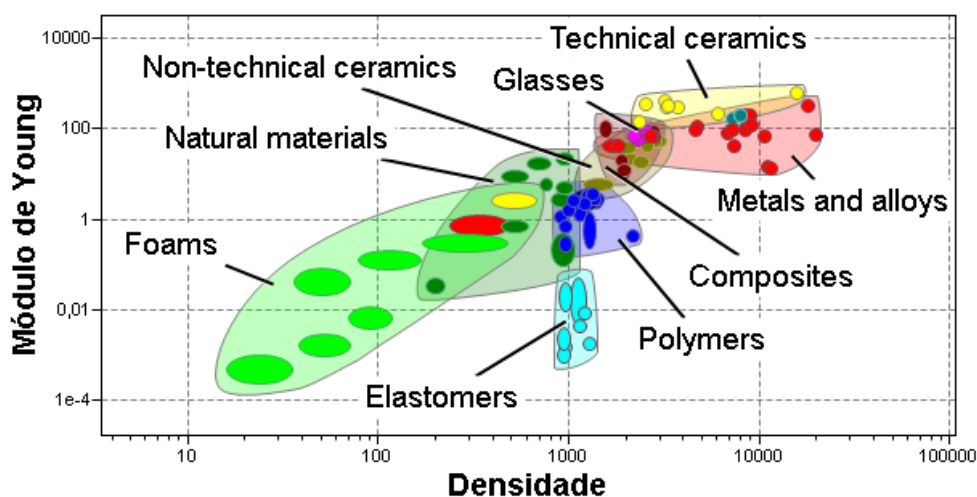
Fonte: Elaborado pelo autor

O material do assoalho mais leve é o que tiver o maior valor do seguinte índice de material:

$$M_1 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

Utilizando o nível 2 do Ces Edupack, o diagrama M_1 foi criado estabelecendo a densidade no eixo horizontal e o módulo de Young no eixo vertical. Dessa forma, como não foi aplicado nenhuma restrição ou limite, os balões do diagrama que delimitam as famílias dos materiais ficam coloridos indicando que todas as opções de materiais foram consideradas na análise, conforme a figura abaixo. Analisando o diagrama, tem-se que as cerâmicas técnicas e os metais e ligas são exemplos de materiais que estão localizados na parte superior direita do diagrama e por isso apresentam um elevado módulo de Young sendo consequentemente rígidos, porém, são pesados. Enquanto isso, a classe das espumas se concentra no lado inferior esquerdo do diagrama e consequentemente são leves por possuírem uma baixa densidade, porém, são flexíveis quando comparados aos outros materiais.

Figura 29 - DPM Módulo de Young x Densidade (M_1)

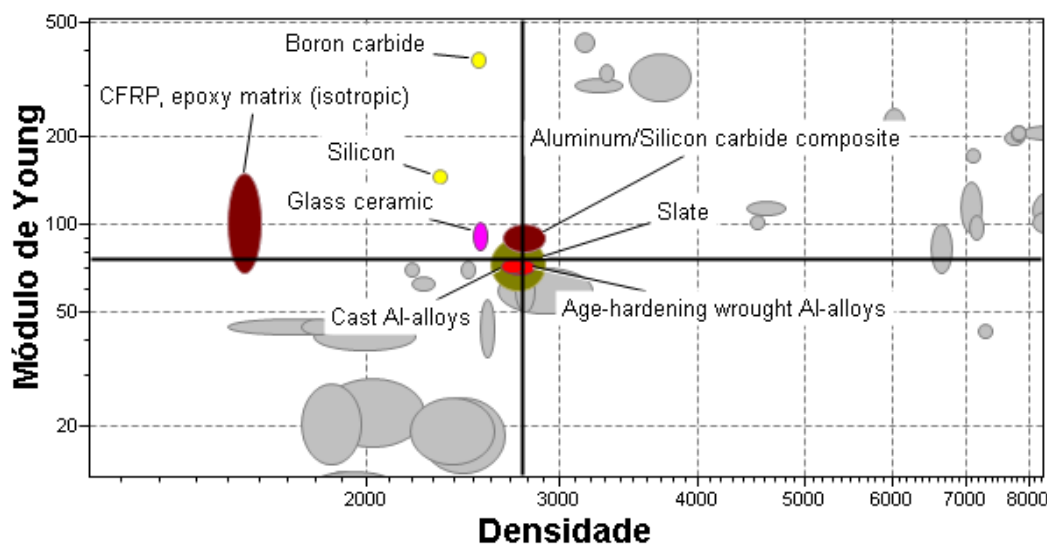


Fonte: Elaborada pelo autor

Para a etapa de triagem e eliminação (figura 30) as restrições absolutas do quadro 10 foram aplicadas no digrama M_1 . Inicialmente, o uso da restrição absoluta da densidade ocorreu por meio da plotagem de uma reta vertical correspondente ao valor mínimo de $2.770 \frac{Kg}{m^3}$, fazendo com que a análise de seleção considerasse todos os materiais localizados à esquerda enquanto que todos os materiais localizados à direita dessa reta fossem descartados, pois são os que apresentaram uma densidade mais alta do que a solicitada pela restrição do assoalho. Em seguida, com relação ao uso da restrição absoluta do módulo de Young, foi plotada uma reta horizontal que considerou somente os valores acima de 76 GPa, dessa forma, oferecendo como

resultado final o número de 8 possíveis candidatos pertencentes às famílias dos metais e ligas, cerâmicas técnicas e não técnicas, compósitos e vidros.

Figura 30 - Diagrama M_1 após a etapa de triagem e eliminação



Fonte: Elaborada pelo autor

Para a realização da etapa de classificação, todos os materiais triados tiveram o IM calculado a partir da utilização da linha de diretriz de seleção com inclinação 3. Com isso, os materiais classificados estão representados no quadro abaixo.

Quadro 11 - Classificação dos materiais triados para o assoalho leve

Material	M_1
CFRP em matriz epóxi	0,00301
Carbeto de Boro	0,00285
Silício	0,00227
Cerâmica de vidro	0,00178
Alumínio reforçado com partículas de SiC	0,00161
Ligas de Alumínio Fundido	0,00154
Ardósia	0,00153
Ligas de Alumínio Forjado	0,00151

Fonte: Elaborado pelo autor

Na última etapa da seleção do material para o assoalho, foram considerados os quatro candidatos que tiveram os maiores IM, sendo eles: CFRP em matriz epóxi, Carbeto de Boro, Silício e a Cerâmica de Vidro, pois, maximizam melhor o desempenho do projeto de acordo com os requisitos (restrições e objetivo), por isso,

foram selecionados como os mais apropriados para serem submetidos à etapa de documentação, tratada no quadro 12:

Quadro 12 – Documentação dos melhores candidatos para o assoalho leve

Material	Documentação
CFRP	Os CFRP em matriz epóxi oferecem maior rigidez e resistência. Possui aplicação típica em membros estruturais leves no setor aeroespacial, componentes automotivos e equipamentos esportivos, como tacos de golfe, remos, barcos e raquetes, molas e vasos de pressão.
Carbeto de Boro	O Carboneto de Boro (B_4C) é quase tão duro quanto o diamante e muito menos caro (embora ainda não seja barato). Sua densidade muito baixa e alta dureza o tornam atraente para a camada externa da armadura à prova de balas, como bicos para jateamento de areia e como abrasivo.
Silício	É um elemento reativo, importante como um elemento de liga em aços, ferros fundidos e em algumas ligas de cobre e alumínio, onde oferece resistência e resistência à corrosão. O Silício é transparente para o infravermelho e é usado em janelas e lentes para lasers IR. Sua aplicação mais importante é como um semicondutor, com o uso típico nos microcircuitos, sistemas microeletromecânicos (MEMS) e instrumentos de precisão.
Cerâmica de Vidro	É vendido como aquecedor pirocerâmico e é usado para aplicações de resistência ao calor de alto desempenho. Os usos típicos são nas aplicações fotossensíveis, utensílios de cozinha, lasers, vidros duplos, bancos de espelho para telescópio, revestimento exterior e interior, bancadas de laboratório, entre outros.

Fonte: Elaborado pelo autor

Dessa forma, analisando a etapa de documentação é possível concluir que os CFRP em matriz epóxi são os melhores candidatos para serem substitutos do material atualmente utilizado (Alumínio) no assoalho do veículo da equipe UFPBaja, pois, além de apresentarem uma boa resistência, possuem uma ótima densidade e rigidez, e também um histórico na aplicação automotiva.

5. CONCLUSÃO

5.1. Conclusão

Neste trabalho foi investigado por meio do software Ces Edupack um método sistemático e inovador, desenvolvido por Michael Farries Ashby, de fazer a seleção dos materiais que melhor atendessem ao objetivo juntamente com as restrições de projeto para o disco de freio, o braço de suspensão e o assoalho do protótipo da equipe UFPBaja. O objetivo foi o de selecionar os materiais mais leves possíveis para os componentes analisados e ainda garantir que desempenhassem suas respectivas funções de forma completamente segura. Todo o processo de seleção ocorreu com o auxílio do banco de dados nível 2 e nível 3 do Ces Edupack 2019 bem como pelas ferramentas que integram o software. Para cada elemento estudado neste trabalho, através do objetivo e das restrições funcionais foram utilizados parâmetros conhecidos como Índice de Material (IM) para o desenvolvimento dos Diagramas de Propriedades de Materiais (DPM), que se mostraram fundamentais na triagem e eliminação do número elevado de materiais, na classificação das opções viáveis e na documentação dos melhores candidatos para a seleção. Com relação aos resultados obtidos observou-se que os materiais que atendem a baixa densidade são: ferro fundido cinzento para o disco de freio, compósitos de matriz metálica para o braço de suspensão, tendo como exemplo de material a liga de Alumínio reforçado com Al_2O_3 , e o CFRP em matriz epóxi para o assoalho. Em termos de valores, comparando a densidade desses materiais selecionados com os materiais utilizados pela equipe, a redução geral da densidade é de 8,14% para o disco de freio, 113,94% para o braço de suspensão (56,97% corresponde apenas a uma bandeja) e 42,24% para o assoalho.

De modo geral o método e o software mostraram-se satisfatórios para a escolha alternativa dos materiais visando a redução de peso das peças, que assim possibilita o aumento da performance do protótipo nos campeonatos. Portanto, pode-se dizer que para a área de seleção dos materiais este trabalho torna-se um recurso de aprendizado importante para futuros projetos da Equipe UFPBaja.

5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

O escopo deste trabalho teve como destaque a seleção dos materiais, então, recomenda-se também para trabalhos futuros a seleção através da metodologia de Ashby dos processos de fabricação mais econômicos e convenientes com a realidade vivenciada no projeto UFPBaja. A metodologia de Ashby é aplicada também para situações em que os requisitos do projeto constituem de muitas restrições com mais de um objetivo, por meio de ferramentas conhecidas como gráfico de permuta e/ou função penalidade, então para a seleção de materiais dos componentes com múltiplas restrições e objetivos, como é o caso da pinça de freio, recomenda-se a utilização dessas ferramentas. E para finalizar, uma sugestão seria utilizar a ferramenta *Eco Audit* do software para realizar uma seleção a partir de uma abordagem restrita ao impacto ambiental visando o desenvolvimento da consciência sustentável dos materiais.

6. REFERÊNCIAS

- ASHBY, Michael; **Seleção de Materiais no Projeto Mecânico**. 4ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- SHIGLEY, Joseph E.; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G.; **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- CALLISTER, William D.; JR; **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.
- SAE BRASIL. **Programas Estudantis**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- SAE BRASIL. **Regulamento Administrativo e Técnico Baja SAE BRASIL**. Disponível em: <<http://portal.saebrasil.org.br/programas-estudantis/baja-sae-brasil/regras/new>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- GARAGEM 83. **Entrevista com a equipe UFPBAJA**. Disponível em: <<https://www.garagem83.com.br/materia/206,,entrevista-com-a-equipe-ufpbaja.html>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- SIGAA UFPB. Projeto e fabricação de veículo competitivo, “BAJA SAE” desenvolvido por alunos dos Cursos de Engenharia do Centro de Tecnologia. Disponível em: <<https://sigaa.ufpb.br/sigaa/>>. Acesso em: 30 mar. 2020.
- FERRANTE, Maurizio. **Seleção dos materiais de construção mecânica: estratégias e metodologia básica**. In: Simpósio sobre materiais, 2000, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10113/>>. Acesso em 30 mar. 2020
- Ferrante, Maurizio; Walter, Yuri. A materialização da ideia: noções de materiais para design do produto. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- GRANTA DESIGN. **History**. Disponível em: <<https://grantadesign.com/about/company/history/>>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- NOGUEIRA, G. C. L. E. **Modelagem e análise de discos de freio para Baja SAE**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade Federal Fluminense, Brasil. 2017. Disponível em: <<https://app.uff.br/riuff/handle/1/6998>>. Acesso em: 31 mar. 2020.
- Oder, G. & Reibenschuh, M. & Lerher, T. & Šraml, Matjaž & Šamec, Blaž & Potrc, I. 2009. **Thermal and stress analysis of brake discs in railway vehicles**. Advanced Engineering. 3. 95-102

MACNAUGHTON, M. **Cast Iron and Brake Discs – a Brief History of their Development and Metallurgy**. Foundryman, October, 1998. Disponível em: <<https://foundrygate.com/upload/artigos/Cast%20iron%20brake%20discs%20-%20a%20brief%20history%20of%20their%20development%20and%20metallurgy.pdf>>. Acesso em: 31 mar. 2020.

BREZOLIN, A. **Estudo de Geração de Trincas Térmicas em Discos de Freios de Veículos Comerciais**. Dissertação de Mestrado - Universidade de Caxias do Sul, Brasil 2007.

Kao, T.K. & Richmond, J.W. & Douarre, A. (2000) "**Brake disc hot spotting and thermal judder: an experimental and finite element study**", Int. J. of Vehicle Design, Vol. 23, Nos. 3/4, pp. 276-296.

ALMEIA JUNIOR, V. **Parametrização dos valores de geometria do sistema de suspensão de veículos de passageiros**: Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil 2007. Disponível em: <http://www.automotiva-poliusp.org.br/wp-content/uploads/2013/02/valdeck_almeida.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2020.

ALMEIDA, D. D. A. **Dimensionamento cinemático e dinâmico de suspensão duplo A**. Trabalho de conclusão de curso - Universidade de Brasília, Brasil. 2012. Disponível em: <https://bdm.unb.br/bitstream/10483/4137/1/2012_DanieldeAraujoAlmeida.pdf> Acesso em: 31 mar. 2020.

DESHMUKH, Nayan; NEGI, Vivek Singh; DESHPANDE, Amit. **Design of Double Wishbone Suspension System of BAJA Vehicle**. International Journal of Advance Engineering and Research Development: IJAERD, Sinhgad Academy of Engineering, Índia, v. 4, n. 12, p. 852-859, 2017. Disponível em: <http://ijaerd.com/papers/finished_papers/Design%20of%20Double%20Wishbone%20Suspension%20System%20of%20BAJA%20Vehicle-IJAERDV04I1294906M.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2020.

DIETER; E, George; **ASM Handbook: Materials Selection and Design**. Vol. 20. 1ª ed. EUA: ASM International, 1997.

ASHBY, Michael; SHERCLIFF, Hugh; CEBON, David; **Materiais: engenharia, ciência, processamento e projeto**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.