

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

JOSÉ LOURENÇO ALVES CRUZ

**SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS EM UM PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
PELO MÉTODO ASHBY: ESTUDO DE CASO DE UMA BIELA DO MOTOR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

JOSÉ LOURENÇO ALVES CRUZ

**SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS EM UM PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA PELO MÉTODO ASHBY: ESTUDO DE CASO DE UMA BIELA DO
MOTOR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Campus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Bellini
Medeiros

PATO BRANCO

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

SELEÇÃO DE MATERIAIS E PROCESSOS EM UM PROTÓTIPO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PELO MÉTODO ASHBY: ESTUDO DE CASO DE UMA BIELA DO MOTOR

JOSÉ LOURENÇO ALVES CRUZ

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 20/06/2018 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

Prof. Dr. Dalmarino Setti
(UTFPR)

Prof. Dr. Fábio Rodrigo Mandello Rodrigues
(UTFPR)

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros
(UTFPR)
Orientador

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk

Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

DEDICATÓRIA

Dedico a meus pais, Álvaro Lourenço da Cruz e Maria Alice de Aguiar Alves sem eles, essa conquista não seria possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado força, saúde, tranquilidade e fé para enfrentar as dificuldades que me foram submetidas durante essa trajetória.

Toda minha família, principalmente meus pais Álvaro e Maria Alice que me ofereceram todo suporte para estudar fora de casa sem deixar que nada me faltasse. Sempre me mantendo motivado e me fortalecendo nos momentos difíceis.

A toda equipe Pato a Jato, por ser possível a elaboração desse trabalho, além de me proporcionar vivências enriquecedoras para minha formação acadêmica, minha formação social e também desenvolver e aplicar conhecimentos específicos do curso de engenharia mecânica.

Ao meu orientador Bruno Bellini Medeiros por dedicar seu tempo e conhecimento na construção desse trabalho.

A Thainá por ter me motivado e me fortalecido para seguir em frente com a conquista do meu objetivo de conclusão de curso.

A todos os meus amigos, tanto os de Salvador quanto os construídos na trajetória acadêmica no Paraná, pela união e descontração nos momentos em que mais era preciso.

RESUMO

CRUZ, José Lourenço Alves. Seleção de materiais e processos em um protótipo de eficiência energética pelo método Ashby: Estudo de caso de uma biela do motor. 2018. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Este trabalho aborda o processo de seleção de materiais e processos de fabricação pela metodologia desenvolvida por Michael F. Ashby, os métodos analíticos e gráficos foram utilizados para realizar a classificação dos melhores candidatos para a seleção, desenvolvendo mapas de propriedades e os conceitos de índice de mérito. O estudo de caso foi desenvolvido aplicando a metodologia descrita no componente biela do motor do protótipo de eficiência energética da equipe Pato a Jato baseado no estudo de caso apresentado por Ashby com o objetivo de selecionar o material mais leve e com o processo de fabricação mais econômico para o componente e assim ser possível reduzir a sua massa e melhorar sua eficiência. O trabalho tem como objetivo também complementar outros estudos relacionados à equipe para possibilitar a melhoria contínua da eficiência energética do veículo em questão. A aplicação dessa metodologia requer a utilização de ferramentas, e foi realizada com o auxílio do software CES-Edupack 2018, na grande maioria das etapas onde foi possível desenvolver os mapas de propriedade utilizados no método analítico e no método gráfico para classificar a partir do objetivo de redução de massa e triar a partir de uma biblioteca avançada de materiais que foram apresentados facilitando a visualização das famílias dos materiais e os processos de seleção de materiais além de obter os de processos de fabricação compatíveis mais econômicos. A partir do trabalho realizado foi possível selecionar uma liga não metálica de berílio para fabricação de uma biela mais leve que a original e além disso, foi possível selecionar o processo de fabricação compatível com o material mais barato a partir do tamanho do lote.

Palavras-chave: Seleção de materiais, Mapas de Ashby, Índice de mérito, Eficiência energética.

ABSTRACT

CRUZ, José Lourenço Alves. SELECTION OF MATERIALS AND PROCESSES IN AN ENERGY EFFICIENCY PROTOTYPE BY THE ASHBY METHOD: CASE STUDY OF A MOTOR CONROD. 2018. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

This work deals with the process of selection of materials and manufacturing processes by the methodology developed by Michael F. Ashby, the analytical methods and graphs were used to carry out the classification of the best candidates for the selection, developing properties maps and the index concepts of merit. The case study was developed applying the methodology described in the connecting rod component of the Pato a Jato team's energy efficiency prototype engine based on the case study presented by Ashby in order to select the lightest material and the most economical manufacturing process for the component and thus be able to reduce its mass and improve its efficiency. The work also aims to complement other studies related to the team to enable the continuous improvement of the energy efficiency of the vehicle in question. The application of this methodology requires the use of tools, and was done with the help of software CES-Edupack 2018, in the great majority of the stages where it was possible to develop the property maps used in the analytical method and in the graphic method to classify from the objective of mass reduction and triage from an advanced library of materials that were presented facilitating the visualization of families of the materials and the processes of selection of materials besides obtaining those of compatible manufacturing processes more economical. From the work done it was possible to select a non-metallic alloy of beryllium to make a connecting rod lighter than the original and in addition, it was possible to select the manufacturing process compatible with the cheaper material from the lot size.

Keywords: Material Selection, Ashby charts, Performance index, Energy efficiency

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 01- O Fluxograma do projeto..... | 14 |
| Figura 02- Análise de um sistema técnico como uma subdivisão em unidades e componentes..... | 15 |
| Figura 03- Nesse modo de apresentação do processo de projeto o sistema técnico é subdividido em subsistemas conectados a cada qual desempenha uma função específica..... | 16 |
| Figura 04- O caminho do projeto. O processo este completo quando é possível identificar um caminho desde "necessidade" ate "especificação". As regiões C representam conceitos, as regiões e corporificações das regiões C e as regiões D, realizações detalhadas das regiões..... | 17 |
| Figura 05- Fluxograma de um projeto..... | 18 |
| Figura 06- A principal problemática da seleção de materiais a interação entre material, função, forma e processos..... | 19 |
| Figura 07- Um exemplo de estratégia de seleção..... | 21 |
| Figura 08- Gráfico do módulo de Young em relação à densidade. As regiões em cinza indicam dados para uma determinada classe de material..... | 24 |
| Figura 09- Mapa de propriedades que relaciona módulo de Young com resistência..... | 25 |
| Figura 10- Diagrama apresentado a inclinação da reta do índice de mérito..... | 26 |
| Figura 11- Estratégia de seleção de materiais..... | 27 |
| Figura 12- Problemática da seleção de materias..... | 29 |
| Figura 13- Análise gráfica, diagrama de $m_1 \times m_2$ | 30 |
| Figura 14- Análise gráfica, diagrama de $M_2 \times M_1$ | 31 |
| Figura 15- Seleção de processos depende do material e forma..... | 32 |
| Figura 16 Classificação dos processos..... | 33 |
| Figura 17- Fluxograma para seleção de processos..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 18- Biela motor Branco..... | 38 |
| Figura 19- O Fluxograma metodologia para seleção de materiais..... | 39 |
| Figura 20- Fluxograma seleção de processos..... | 40 |
| Figura 21- Diagrama Módulo de Young por densidade..... | 43 |
| Figura 22- Restrição à fadiga..... | 44 |
| Figura 23- Restrição para a temperatura..... | 45 |
| Figura 24- Restrição de flambagem..... | 46 |
| Figura 25- Diagrama m2 x m1..... | 51 |
| Figura 26- Melhores Candidatos..... | 52 |
| Figura 27- Diagrama M2 x M1..... | 53 |
| Figura 28- Melhores Candidatos..... | 54 |
| Figura 29- Seleção atribuída aos valores do carregamento estrutural igual a 0,05 Mpa..... | 55 |
| Figura 30- Melhores Candidatos..... | 55 |
| Figura 31- Biela resultado para o ciclo Atkinson..... | 57 |
| Figura 32- Seleção atribuída aos valores do carregamento estrutural igual a 2,60 Mpa..... | 57 |
| Figura 33- Melhores Candidatos..... | 58 |
| Figura 34- Interface da seleção de processos no software Ces-Edupack 2018..... | 61 |
| Figura 35- Processos resultants..... | 61 |
| Figura 36- Interface do software Ces-Edupack 2018..... | 62 |
| Figura 37- Índice de custo relativo pelo tamanho do lote para o processo HIP..... | 66 |
| Figura 38- Índice de custo relativo pelo tamanho do lote para o processo de forjamento a frio em matriz fechada..... | 66 |
| Figura 39- Índice de custo relativo pelo tamanho do lote para o processo de forjamento a quente em matriz fechada..... | 67 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 01- Exemplos de índice de mérito ou materiais para devidos esforços e objetivos..... | 23 |
| Tabela 02- Materiais comumente utilizados para fabricação de bielas com propriedades..... | 50 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 01- Detalhamento da tradução..... | 28 |
| Quadro 02- Requisitos do processo..... | 34 |
| Quadro 03- Materiais para fabricação de biela para motores..... | 36 |
| Quadro 04- Requisitos do projeto..... | 42 |
| Quadro 05- Definição dos processos de fabricação resultants..... | 63 |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 2.1 MATERIAIS EM PROJETOS..... | 13 |
| 2.2 O PROCESSO DE PROJETO..... | 14 |
| 2.3 TIPOS DE PROJETO..... | 17 |
| 2.4 FERRAMENTAS DE PROJETO E DADOS DE MATERIAIS..... | 18 |
| 2.5 FUNÇÃO, MATERIAL, FORMA E PROCESSO..... | 19 |
| 2.6 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS..... | 20 |
| 2.7 MÉTODO ASHBY DE SELEÇÃO DE MATERIAIS..... | 21 |
| 2.8 MAPAS DE PROPRIEDADES..... | 23 |
| 2.9 SELEÇÃO DE MATERIAIS COM MÚLTIPLAS RESTRIÇÕES..... | 29 |
| 2.9.1 ESTRATÉGIAS DE SELEÇÃO DE PROCESSOS..... | 31 |
| 2.9.2 BIELAS PARA MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA..... | 35 |
| 2.9.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE BIELAS..... | 36 |
| 3 METODOLOGIA | 38 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 41 |
| 4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS NO PROJETO..... | 41 |
| 4.2 TRADUÇÃO | 42 |
| 4.3 TRIAGEM | 42 |
| 4.4 CLASSIFICAÇÃO | 47 |
| 4.4.1 MÉTODO ANALÍTICO..... | 50 |
| 4.4.2 MÉTODO GRÁFICO..... | 51 |
| 4.5 DOCUMENTAÇÃO | 59 |
| 4.6 SELEÇÃO DE PROCESSOS | 60 |
| 4.6.1 TRADUÇÃO | 60 |
| 4.6.2 TRIAGEM | 62 |

| | |
|--------------------------------|-----------|
| 4.6.3 CLASSIFICAÇÃO | 64 |
| 4.6.3.1 ANÁLISE ECONÔMICA..... | 65 |
| 4.6.4 DOCUMENTAÇÃO | 67 |
| 5 CONCLUSÕES | 68 |
| REFERÊNCIAS | 71 |

1 INTRODUÇÃO

Em um projeto mecânico cabe ao engenheiro criar, desenvolver, projetar, operar, analisar e realizar a manutenção dos equipamentos. Na fase de projetos interessa também ao engenheiro mecânico realizar a escolha dos materiais mais recomendados para as aplicações desejadas na concepção do projeto. Isto é, efetuar a seleção de materiais.

Segundo Ferrante (2002) no desenvolvimento de um componente estabelecer as exigências a serem atendidas orienta uma primeira descrição funcional do projeto. Em outras palavras para que um componente atenda sua função com excelência é fundamental definir bem as condições e os requisitos que serão impostos para esse componente, sendo assim é possível obter fundamentos para estudos de análise de tensões e dimensionamento preliminar. Esses requisitos iniciais relacionados ao estudo das condições ambientais resultam em um catálogo de propriedades cuja o aprimoramento estabelece a essência do processo da seleção de materiais.

O número de materiais disponíveis para os engenheiros é vasto, em torno de, 160 mil ou mais (Ashby, 2005). Por isso é necessário e tão importante conhecer um método para facilitar a seleção dos mesmos. Segundo Callister (2002) “um problema de materiais consiste na seleção do material correto dentre muitos milhares de materiais disponíveis”. Neste universo grande dos materiais, realizar uma escolha coerente e correta de um material que atende aos requisitos do projeto da melhor forma resulta na otimização do produto final. A partir da seleção de materiais é possível diminuir os custos, pois é possível trocar o material de construção por um com propriedades equivalentes, porém com um custo reduzido, além disso, é possível realizar a substituição de materiais para possibilitar a escolha de um processo de fabricação mais econômico. Com base na seleção é viável obter um componente (produto) com as melhores propriedades definidas, para atender a função designada pelo projeto inicial.

O foco deste trabalho consiste em desenvolver um estudo sobre a seleção de materiais na concepção de um protótipo de eficiência energética. O estudo de caso pretende realizar o processo de seleção para a biela do motor do veículo (protótipo) em questão levando em conta a base de dados avançada de materiais do software Ces-Edupack 2018, pretendidos para construção da peça do veículo a fim de

selecionar os materiais que garantem uma melhora considerável da eficiência energética. Reduzir o peso de um veículo, mantendo suas demais características similares, reduz, portanto, a quantidade de energia necessária para o seu deslocamento (IEA, 2012), ou seja, para garantir uma otimização da eficiência é preciso primeiramente alcançar uma redução de peso no veículo. Este é um requisito universal para qualquer produto que seja móvel (Ferrante, 2000, Artigo). A seleção de materiais irá auxiliar nesse quesito para garantir a utilização de materiais mais leves considerando o orçamento disponível para o projeto, além disso, a seleção ajuda na escolha de materiais que prometem melhorar as trocas térmicas ocorridas no motor, busca suavizar os efeitos do atrito e outros elementos contribuindo também em uma melhoria da eficiência garantindo ainda uma boa confiabilidade dos componentes fabricados.

O trabalho a ser desenvolvido visa atuar na seleção de materiais e processos de fabricação no componente biela do motor da equipe de eficiência energética Pato a Jato, cujo objetivo principal é construir um protótipo veicular individual de baixo peso para percorrer uma determinada distância com a menor quantidade de combustível para participar de competições nacionais e internacionais.

O objetivo principal desse trabalho é demonstrar a relevância e a eficácia da seleção dos materiais no projeto mecânico, a seleção é um recurso tecnológico para otimização e redução de custos de projetos. Sendo assim foi possível selecionar o material mais leve e com o processo de fabricação mais econômico para o componente e assim ser possível reduzir a sua massa e melhorar sua eficiência. O trabalho tem como objetivo também complementar outros estudos relacionados à equipe para possibilitar a melhoria contínua da eficiência energética do veículo em questão.

Enfim é abordada a metodologia de padronização das técnicas de seleção de materiais através de matrizes de decisão, para ser possível definir os critérios de seleção apresentadas por estudos de casos definidos pelo método de Ashby.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MATERIAIS EM PROJETOS

Segundo Ashby (2005) projeto é o processo de tradução de uma nova ideia ou uma necessidade de mercado em informação detalhada a partir do qual o produto pode ser fabricado. Qualquer etapa de projeto exige julgamentos sobre os materiais do quais os produtos serão feitos e os processos que serão utilizados. Para Callister (2002) a escolha de um material não pode ser realizada sem considerar os processos de fabricação exigidos.

O número de materiais disponíveis para os engenheiros é vasto 160 mil ou mais. (Ashby, 2005). Como o engenheiro deve realizar a seleção, a partir dessa ampla variedade de materiais, qual o material mais apropriado para atender a função do produto?

No passado a seleção de materiais era baseada somente na experiência, onde especialistas na seleção executavam a escolha de materiais fundamentada na experiência de como certos materiais foram utilizados em projetos antigos. Não há dúvidas do valor experiência. O mundo da engenharia esta em constante avanço (Ashby, 2005) logo um método que se embasa na experiência não esta em sintonia com o ambiente baseado em os avanços tecnológicos computacionais dos dias atuais.

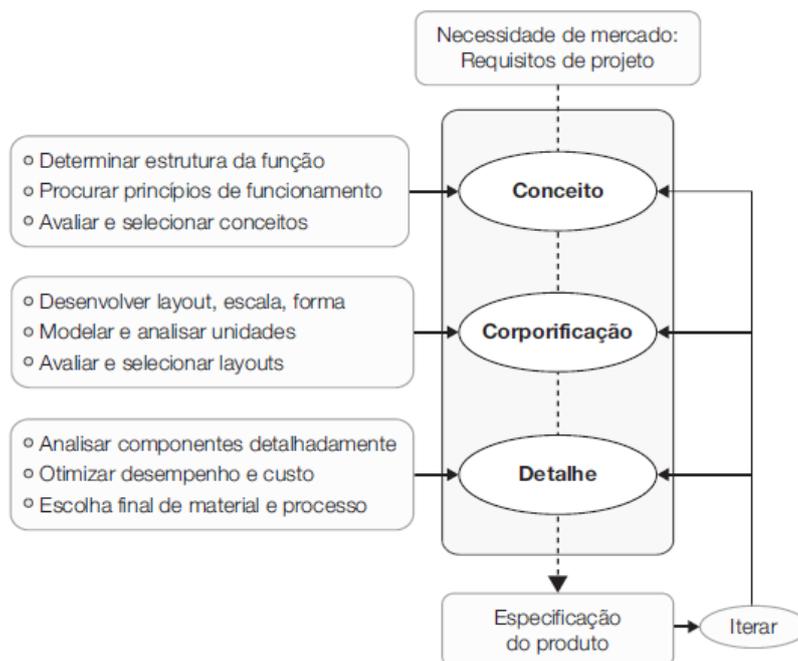
Por isso é necessário utilizar um procedimento sistemático com passos que podem ser ensinados de forma rápida, que possui um amplo alcance das decisões, que permite a prática de avanços computacionais e que seja adaptável com as ferramentas já estabelecidas em projetos de engenharia.

2.2 O PROCESSO DE PROJETO

Ashby (2005, p.16) afirma que o melhor ponto de partida no desenvolvimento de produto é o bom projeto mecânico e como a seleção de materiais e processos contribui para tal. Etchepare e Kindlein Jr. (2002) indicam como ponto central do projeto a necessidade de escolha de materiais e processos de fabricação.

Segundo Ferrante (2002, p.15) no desenvolvimento de um produto, o estabelecimento dos requisitos a serem atendidos norteia uma primeira descrição funcional do projeto. Ou seja, é primordial definir com clareza os requisitos e a necessidade para desenvolver um bom projeto mecânico. Na figura 1 são mostradas as etapas entre a declaração de necessidade e as especificações do produto.

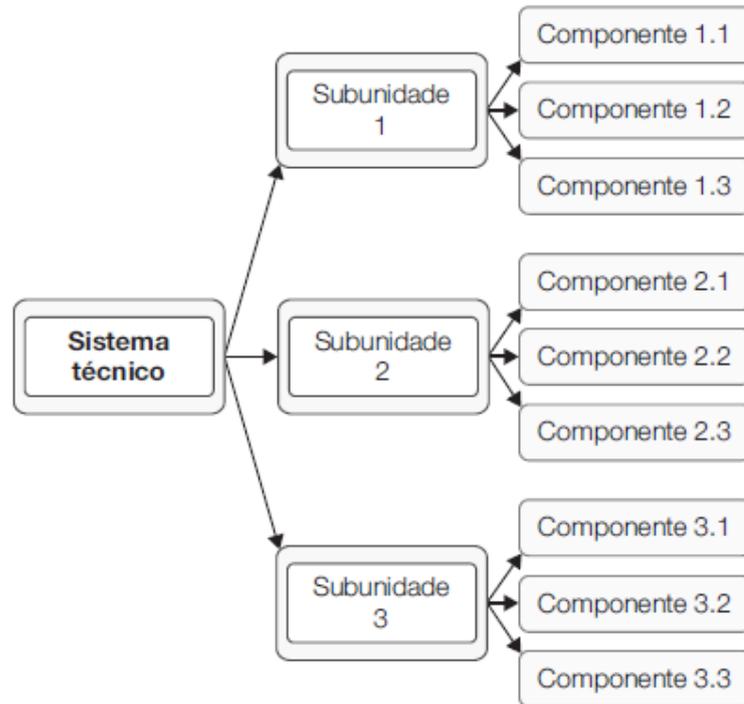
Figura 1- O fluxograma de projeto



Fonte: Ashby (2005)

Para Ashby (2005, p.16) o produto em si é denominado sistema técnico. Um sistema técnico consiste em subunidades e componentes, reunidos de modo tal que executa a tarefa exigida. Na figura 2 fica exemplificado o sistema técnico, vale salientar que a seleção de materiais ocorre no nível do componente.

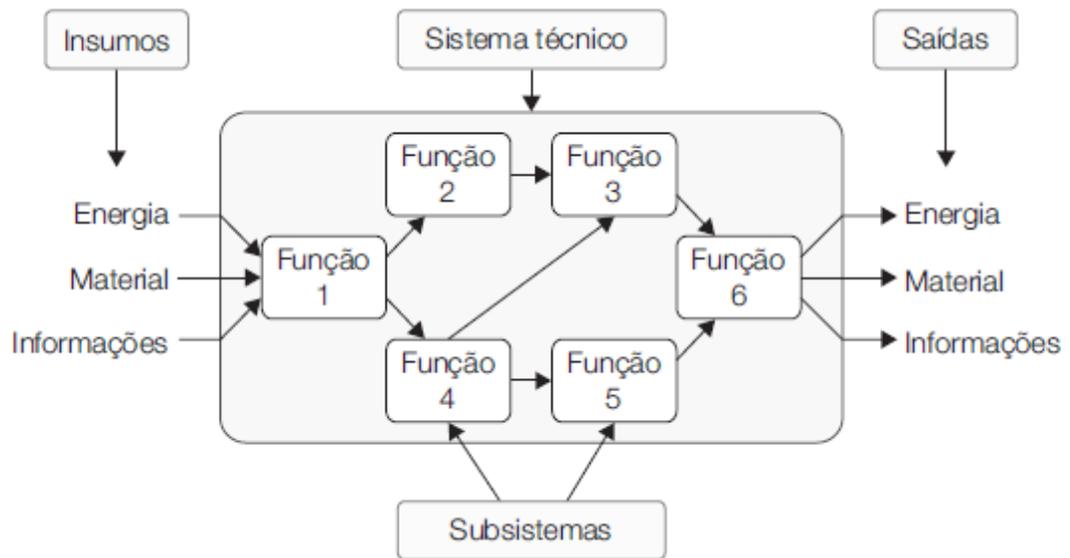
Figura 2- Análise de um sistema técnico como uma subdivisão em unidades e componentes



Fonte: Ashby (2005)

De acordo com Ashby a subdivisão demonstrada na figura 2 é útil para averiguar somente um projeto já existente, mas não ajuda muito no processo de projeto em si, ou seja, no planejamento de novos projetos. Para essa finalidade é preferível realizar uma subdivisão que se baseia nas ideias da análise de sistemas, que considera os insumos, fluxos e saídas de informações, energia e materiais. Exemplificado na figura 3.

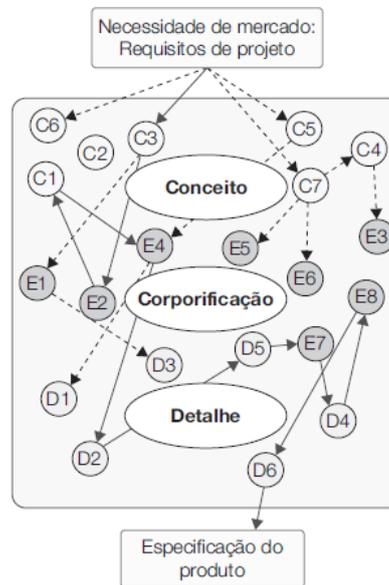
Figura 3- Nesse modo de apresentação do processo de projeto o sistema técnico é subdividido em subsistemas conectados a cada qual desempenha uma função específica



Fonte: Ashby (2005)

O projeto prossegue com o desenvolvimento de conceitos para executar as funções na estrutura da função, cada uma baseada em um princípio de funcionamento. (Ashby 2005, p.18) O processo indicado na figura 1 acaba escondendo a forte ligação entre as fases de conceito, corporificação e detalhe. É preciso realizar iteração e laços de retorno para estudar alternativas, essa ligação entre as etapas do projeto é mostrada na figura 4.

Figura 4- O caminho do projeto. O processo este completo quando é possível identificar um caminho desde "necessidade" ate "especificação". As regiões C representam conceitos, as regiões e corporificações das regiões C e as regiões D, realizações detalhadas das regiões



Fonte: Ashby (2005)

Para Ashby uma parte fundamental do projeto, e da seleção de materiais nele, é a flexibilidade, ou seja, a capacidade de explorar alternativas rapidamente levando em conta o grande quadro, assim como os detalhes.

2.3 TIPOS DE PROJETO

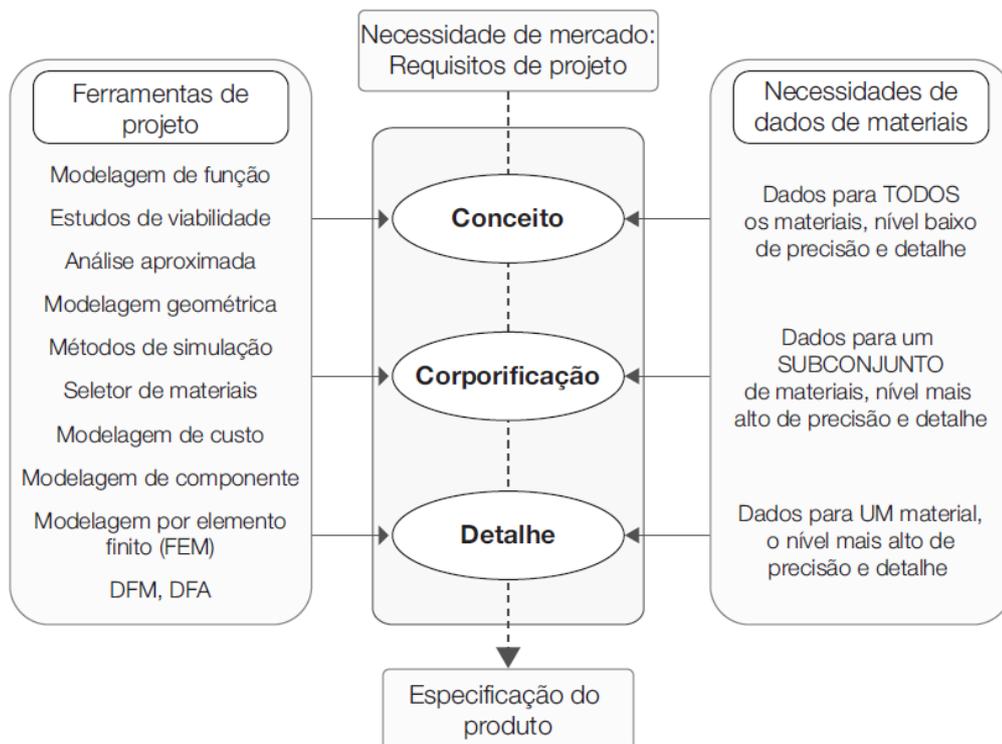
Novos materiais podem oferecer novas e exclusivas combinações de propriedades que habilitam o projeto original (Ashby 2005, p.20). Para Ashby existem três tipos de projeto, original, onde é necessário o envolvimento com uma nova ideia ou princípio de funcionamento, os adaptativos ou desenvolvimentistas, que partem de um produto já existente e buscam aprimora-lo tanto no desempenho quanto no custo ou apenas adaptar esse produto nas condições de mercado. Ou seja, o projeto adaptativo busca incrementar um avanço no desempenho a partir de uma filtragem do princípio de funcionamento de um conceito já existente. O outro tipo de projeto para Ashby é o variante, que consiste em uma mudança de escala ou dimensão sem mudança de função, vale ressaltar que mudanças na escala podem exigir mudança de material.

2.4 FERRAMENTAS DE PROJETO E DADOS DE MATERIAIS

Ferramentas para seleção de materiais exercem um papel considerável em cada etapa do projeto. (Ashby 2005, p.22). As ferramentas preparam a modelagem e o aprimoramento de um projeto mecânico a partir delas é possível suavizar os aspectos frequentes de cada estágio. Modeladores de função apresentam fundamentos de funções que são viáveis. Já os Otimizadores de configuração requintam formas. Com os pacotes de modelagem geométrica e de sólidos em três dimensões é possível visualizar e criar arquivos que podem ser upados para sistemas controlados numericamente. A partir da utilização do Software de otimização, DFM, DFA e de estimativa de custo é possível melhorar os aspectos de fabricação. Pacotes de elemento finito (FE) e de dinâmica de fluidos por computador (CFD) tornam as análises mecânicas e térmicas mais precisas até quando a geometria é complicada.

Na figura 5 é apresentado como as ferramentas de projeto e seleção de materiais se adequam ao sistema.

Figura 5- Fluxograma de um projeto



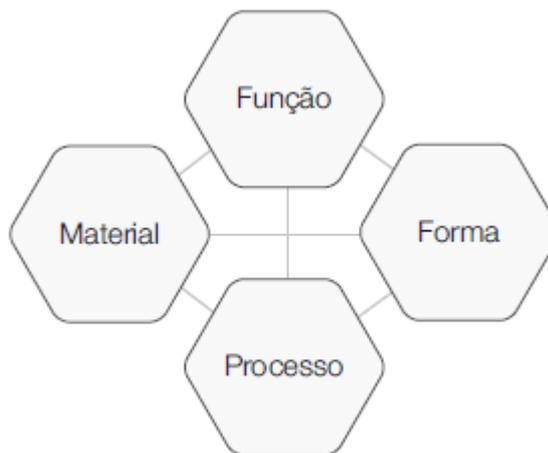
Fonte: Ashby (2005)

É importante salientar que as ferramentas e dados dos materiais variam em amplitude e precisão na medida em que o projeto evolui. Ou seja, no estágio conceitual é apresentada uma modelagem aproximada já no estágio de corporificação a modelagem é mais incrementada. Finalizando no nível do projeto detalhado modelagem e análise da forma mais precisa e exata possível.

2.5 FUNÇÃO, MATERIAL, FORMA E PROCESSO

Para Ashby (2005, p. 23) a seleção de materiais esta ligada a processo e forma. Sendo assim para obter uma forma o material passa por diversos processos de fabricação. Função que o componente irá desempenhar juntamente com material, forma e processo estão interligados mutualmente. Essas interações são de duas vias e são apresentadas na figura 6.

Figura 6- A principal problemática da seleção de materiais a interação entre material, função, forma e processos



Fonte: Ashby (2005)

2.6 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

Para Ferrante (2002, p.18) os procedimentos de seleção de materiais obedecem a múltiplos critérios. Critérios estes que considerados individualmente provocam alternativas de escolha bastante simples e lineares, mas o que acontece na prática é que um material não é selecionado a partir do estudo de um único critério de seleção e sim a partir de um conjunto de critérios conflitantes que devem ser satisfeitos ao mesmo tempo. Com isso a necessidade de procedimentos de interação e otimização.

Segundo Ferrante (2002, p. 18), dentre os mais representativos critérios de seleção, são apontados dezesseis:

- Considerações dimensionais;
- Considerações de forma;
- Considerações de peso;
- Considerações de resistência mecânica;
- Resistência ao desgaste;
- Conhecimento das variáveis de operação;
- Facilidade de fabricação;
- Requisitos de durabilidade;
- Número de unidades;
- Disponibilidade de material;
- Custo;
- Existência de especificações e códigos;
- Viabilidade de reciclagem;
- Valor de sucata;
- Grau de normalização;
- Tipo de carregamento.

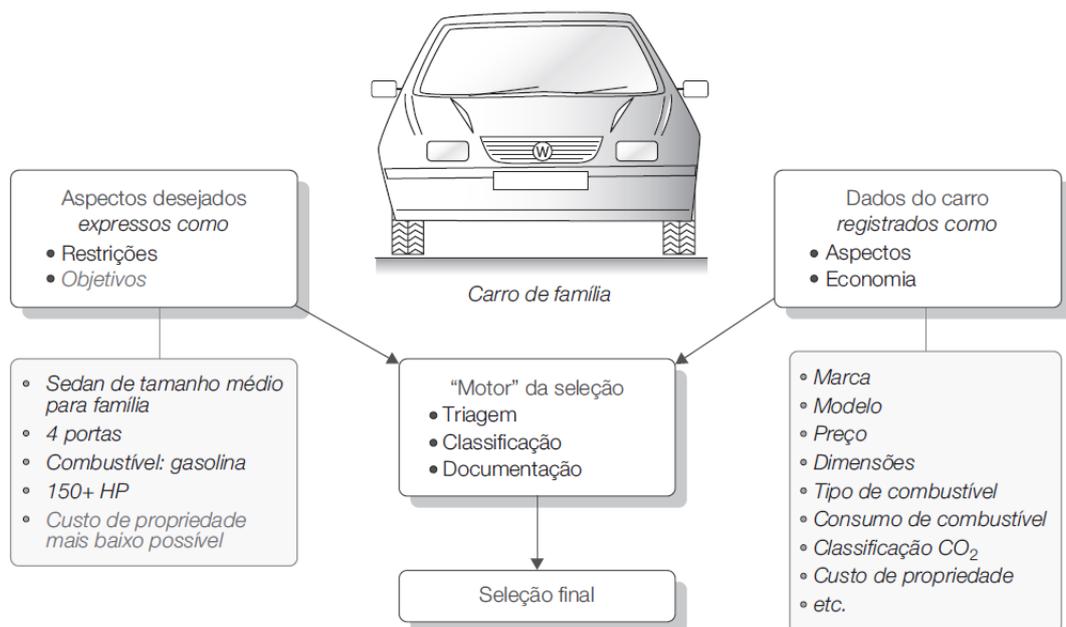
Segundo Ferrante (2002), para que seja realizada uma adequada seleção de um material ou processo frente a outro, é necessário inicialmente levar em conta à função do material, em seguida considerar os requisitos de projeto, as condições de serviço e ambientais, e finalmente obter as propostas alternativas de diferentes materiais e processos que atendem aos fatores condicionantes estabelecidos. Já Patton (1968) aponta que são três os requisitos básicos da Seleção: as exigências

do serviço devem ser consideradas primeiramente para depois considerar as exigências de fabricação e por fim as condições econômicas.

2.7 MÉTODO ASHBY DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

Para o estudo de caso realizado neste trabalho foi escolhido o método Ashby de seleção de materiais. Para exemplificar mais facilmente como funcionam as estratégias de seleção de materiais de Ashby vamos seguir a sequência sugerida em seu trabalho que começa através da seleção de um produto. Na figura 7 abaixo fica exemplificado como ocorre à seleção em nível de produto.

Figura 7- Um exemplo de estratégia de seleção



Fonte: Ashby (2005)

Na figura 7 os aspectos de desejados como restrições e objetivos são indicados e interligados com uma pesquisa de dados de carros que atendem esses requisitos, a partir disto o “motor” da seleção nesse caso a pessoa que deseja adquirir um novo veículo, vai triar e eliminar a partir das restrições aqueles que não atendem aos requisitos iniciais. Depois de feito isso entra etapa da classificação onde o objetivo no exemplo em questão o menor custo é dado como referência para classificar os candidatos que restaram da etapa de triagem. Em vez de escolher

apenas o mais barato é necessário preservar pelo menos os três primeiros colocados na etapa de classificação e seguir para a documentação de outros critérios desejáveis para assim selecionar o veículo que vai atender melhor as condições iniciais.

Na busca de ferramentas que simplifiquem o processo de seleção de materiais, Ashby desenvolveu em 1992 uma metodologia de seleção de materiais. Com esse recurso cada material pode ser especificado por diversos atributos, como por exemplo: densidade, módulo de elasticidade e resistência. Durante a seleção de materiais, é necessário avaliar estes multicritérios que na maioria das vezes são conflitantes, de uma forma a satisfazer todos eles simultaneamente.

A metodologia em questão desenvolve Índices de Mérito, adquiridos a partir de equações que buscam interligar as propriedades que serão responsáveis para o máximo desempenho do material para uma função específica. Ou seja, sua fórmula algébrica apresenta um acordo entre duas características ou propriedades. Na sua forma mais básica o índice de mérito é normalmente uma fração, tendo no numerador a propriedade ou característica que se quer potencializar e no denominador a que se deseja diminuir.

$$I_m = \frac{E}{\rho} \quad (1)$$

A equação acima representa o índice de mérito entre as propriedades de módulo de Young e densidade.

A Tabela 1 dá exemplos de índices e dos problemas de projeto que são caracterizados por eles. Segundo Ashby cada combinação de função, objetivo e restrição são responsáveis para obter um índice de mérito.

Tabela 1- Exemplos de índice de mérito ou materiais para devidos esforços e objetivos

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

Fonte: Ashby (2005)

2.8 MAPAS DE PROPRIEDADES

O índice de mérito apresentado acima será analisado a partir dos Mapas de Propriedades de materiais, para Ferrante (2002, p. 50):

“A essência desse conceito de Seleção de Materiais encontra-se nos Mapas de Propriedades desenvolvidos por M. F. Ashby. Eles procuram agrupar todas as famílias de materiais em gráficos cujas coordenadas compõe, sempre que possível, índices de mérito utilizados em cálculos de dimensionamento e seleção”.

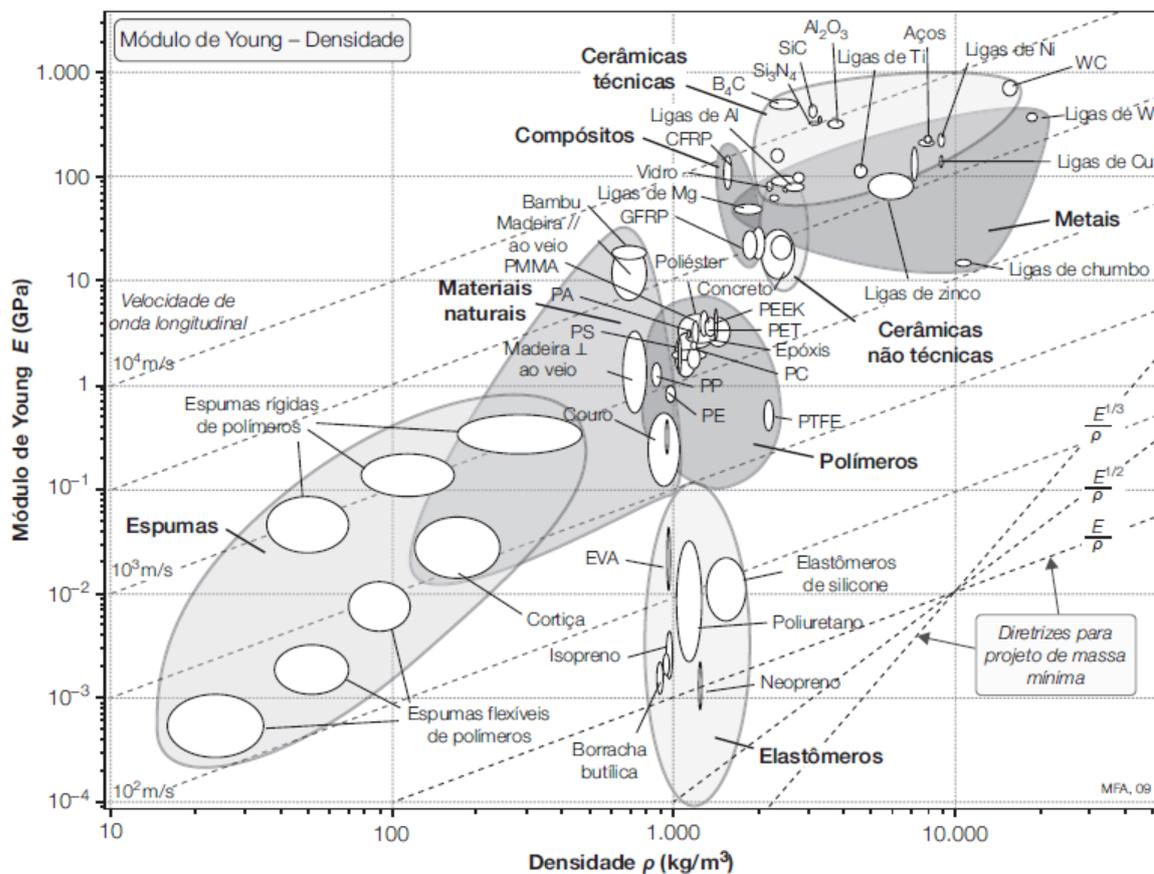
No mapa de propriedades desenvolvido por Ashby a ordem e os arquivos das propriedades dos materiais são objeto dos bancos de dados, que podem ser ou não complexos, sendo atribuídas tabelas básicas ou até modos de busca de propriedades de uma maneira computadorizada. A representação gráfica consiste em um sistema de coordenadas ortogonais os eixos X e Y podem ser identificados com propriedades, desenvolvendo os denominados Mapas das Propriedades dos

Materiais que possibilitam comparar diretamente um vasto número de materiais através de seus respectivos índices de mérito.

A vantagem dos mapas de propriedades é a possibilidade de facilitar a visualização do amplo número de materiais e suas classes, permitindo ao engenheiro uma escolha otimizada, sendo possível encontrar os materiais que demonstram a melhor relação entre as propriedades requeridas pelo projeto mecânico daquele componente.

O exemplo a seguir mostra um Mapa de Propriedades (Figura 8), ele é o mapa de módulo de Young versus densidade; pode ser utilizado em processos de seleção que tem o objetivo de reduzir a massa em projetos orientados pela elasticidade.

Figura 8- Gráfico do módulo de Young em relação à densidade. As regiões em cinza indicam dados para uma determinada classe de material

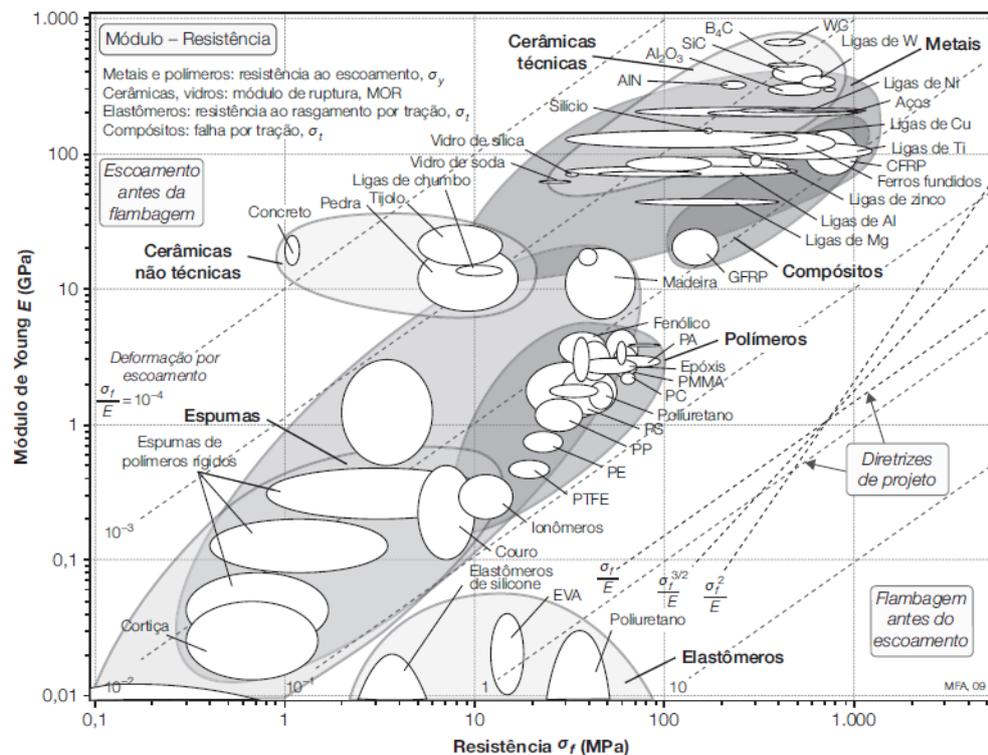


Fonte: Ashby (2005)

Entre as propriedades mecânicas e térmicas, há 30, mais ou menos, que são de importância primordial, tanto para a caracterização do material quanto para o projeto de engenharia. (Ashby 2005, p.62). Por isso a necessidade de organizar de um modo útil a partir dos diagramas de seleção de materiais.

Outro diagrama que é bem representado por Ashby é diagrama que relaciona módulo de Young versus resistência. Diagrama representado na figura 9. Este mapa de propriedades ajudam na seleção de materiais para molas, pivôs, fios de faca, diafragmas e dobradiças.

Figura 9- Mapa de propriedades que relaciona módulo de Young com resistência



Fonte: Ashby (2005)

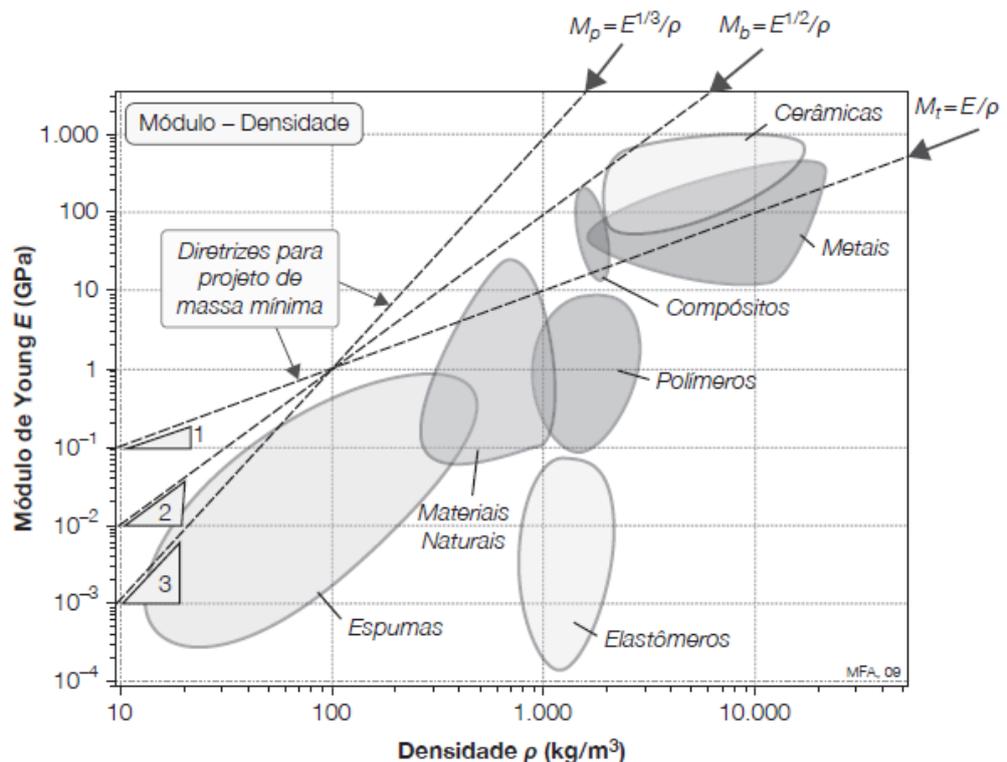
Como o foco do trabalho consiste na redução de peso do protótipo de eficiência energética os mapas de propriedades que relacionam a densidade serão os de maior interesse de análise.

Os diagramas resumem propriedades de materiais de um modo compacto, de fácil acesso, mostrando a faixa abrangida por cada família e classe de material. A escolha sensata dos eixos nos permite apresentar mais informações. (Ashby 2005, p. 93).

O método em questão desenvolve Índices de Mérito, que são desenvolvidos com base em equações que tem como finalidade relacionar as propriedades que irão apresentar o melhor desempenho do material para uma função específica. O índice de mérito será estudado com o auxílio dos Mapas de propriedades de materiais.

A figura 10 abaixo apresenta o diagrama do módulo de Young em relação à densidade em escalas logarítmicas. Os índices de mérito podem ser representados nesse diagrama como retas que descrevem a inclinação de uma família de retas paralelas pertencentes ao o respectivo índice de mérito.

Figura 10 – Diagrama apresentado a inclinação da reta do índice de mérito



Fonte: Ashby (2005)

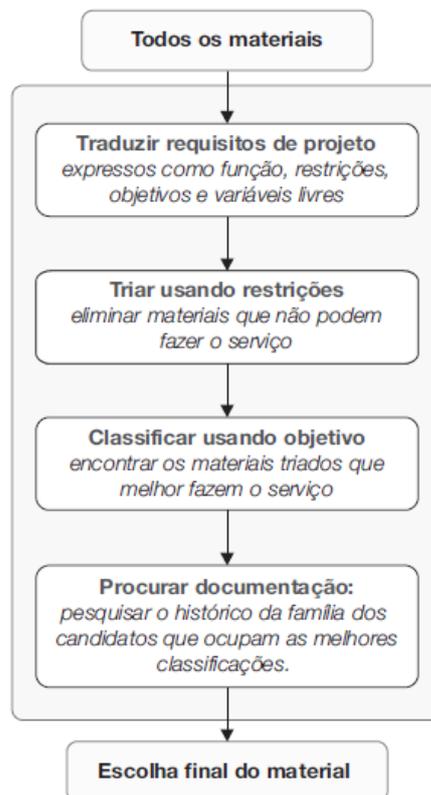
Para a linha, por exemplo, a m1 pode ser representada $\frac{E}{\rho} = C$ ou em termos logarítmicos:

$$\text{Log}(E) = \text{Log}(\rho) + \text{Log}(C) \quad (2)$$

Representando a reta com a inclinação 1 no diagrama, cada linha representa um valor da constante C.

Segundo Ashby (2005) selecionar materiais envolve a busca do melhor entendimento entre os requisitos de projeto e as propriedades dos materiais que poderiam ser usados para elaborar o projeto. A estratégia desenvolvida por Ashby para a seleção de materiais esta apresentada na figura 11 abaixo.

Figura 11 - Estratégia de seleção de materiais



Fonte: Ashby (2005).

A partir da tradução dos requisitos do projeto é possível realizar a etapa de triagem, neste estágio são eliminados os candidatos que não são os mais indicados para desempenhar a função desejada, pois suas características não estão de acordo com as restrições e os objetivos pretendidos.

Na etapa de classificação os pretendentes restantes são classificados e ordenados por ordem de quão melhor o candidato cumpre os requisitos e objetivos do projeto, para isso é necessário utilizar critérios de otimização, que são atribuídos aos índices de mérito que relacionam as propriedades que necessitam ser maximizadas ou minimizadas. Ou seja, para Ashby a triagem isola candidatos que são capazes de fazer o serviço e a classificação identifica, entre eles, os que podem fazer melhor o serviço.

Por fim ocorre o estagio de documentação, que consiste em buscar um perfil detalhado de cada candidato restante ate essa etapa. Segundo Ashby (2005) a fase de documentação auxilia ainda mais na redução da lista até uma escolha final, possibilitando um arranjo definitivo entre requisitos de projeto e atributos de materiais.

Para simplificar as condições de contorno da problemática de seleção na etapa de tradução, Ashby utiliza o quadro 1 abaixo, que apresenta claramente qual a função, restrição, objetivos e variáveis livres que podem ser ajustada para obter a melhor relação entre os atributos do material para desenvolver uma função específica.

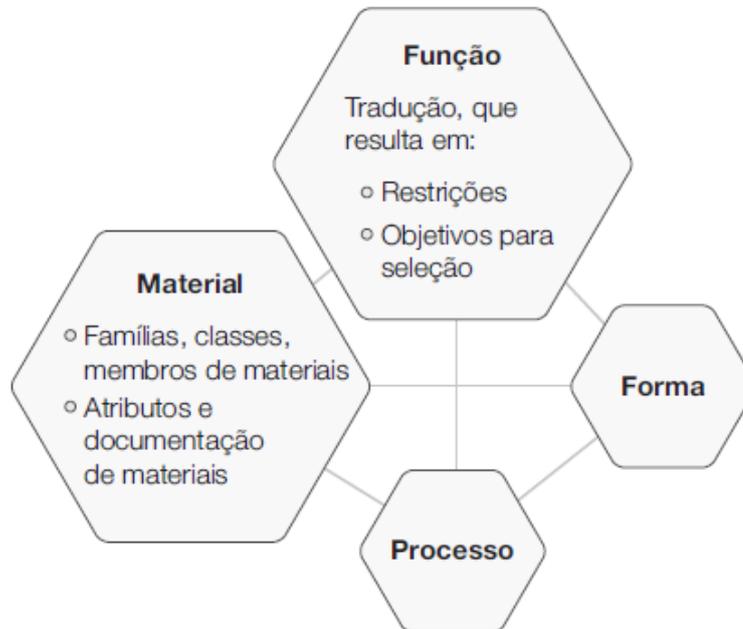
Quadro 1- Detalhamento da tradução

| | |
|---|---|
| Função | O que o componente faz? |
| Restrições* | Quais são as condições não negociáveis que ele deve cumprir? Quais são as condições negociáveis, porém desejáveis, que ele deve cumprir? |
| Objetivo | O que deve ser maximizado ou minimizado? |
| Variável livre | Quais são os parâmetros do problema que o projetista tem liberdade de mudar? |
| * Às vezes é útil distinguir entre restrições "absolutas" e "relativas". Rigidez e resistência devem ser requisitos absolutos (restrições absolutas); custo pode ser negociável (restrição relativa). | |

Fonte: Ashby (2005)

Para Ashby uma das principais problemáticas da seleção de materiais é a interação entre material, função, forma e processos, exemplificado na figura 12. Acima foi apresentada a relação entre material e função. No tópico a seguir será apresentada a importância da seleção de processos atrelada à seleção de matérias de um projeto mecânico.

Figura 12 - Problemática da seleção de materiais



Fonte: Ashby (2005)

2.9. SELEÇÃO DE MATERIAIS COM MÚLTIPLAS RESTRIÇÕES

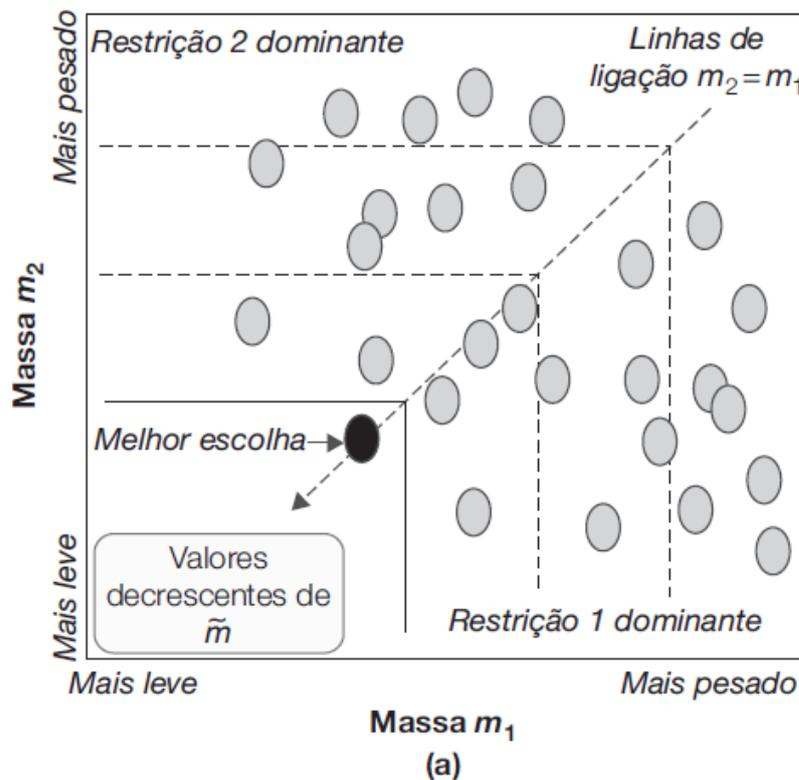
Segundo Ashby (2005) a maioria dos problemas de seleção de material tem excesso de restrições para um único objetivo. No caso de um problema que apresente duas restrições com o objetivo de reduzir a massa, se a primeira restrição é dominante a massa é m_1 , se for à segunda restrição dominante é m_2 . Para o componente atender as duas restrições a sua massa têm de ser a maior entre as duas.

A partir da metodologia proposta por Ashby (2005) é preciso encontrar o menor valor de uma métrica que é o maior valor entre m_1 e m_2 para o caso de duas restrições.

Existem métodos eficientes para resolver esses problemas de seleção com múltiplas restrições, o método analítico e o método gráfico. O primeiro consiste em analisar as duas massas m_1 e m_2 para cada família de materiais, eleger a maior entre as duas e a partir disso classificar buscando um valor mínimo. Porém esse método só funciona para condições de forma já previamente estabelecidas. Já o método gráfico constrói diagramas utilizando as equações de massas m_1 e m_2 nos eixos e também diagramas com os índices M_1 e M_2 como eixos e busca encontrar os

mínimos valores para essas massas e esses índices de uma forma geral levando em conta apenas as propriedades dos materiais como é mostrado nas figuras 13 e 14 abaixo:

Figura 13 Análise gráfica, diagrama de $m_1 \times m_2$



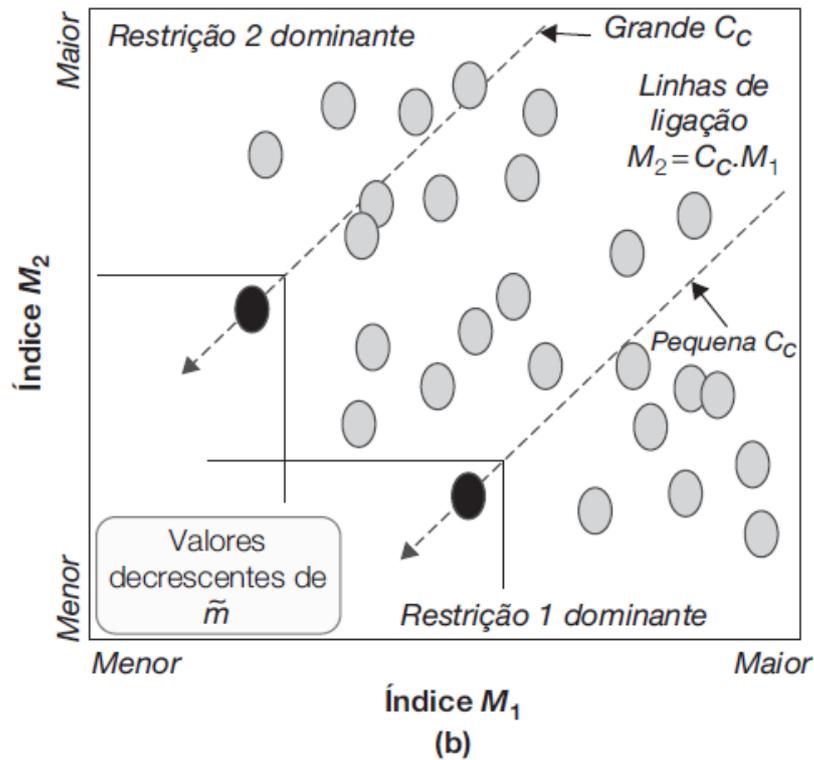
Fonte: Ashby (2005)

A linha $m_2 = m_1$ divide o diagrama em duas regiões. Em uma delas a restrição de fadiga (m_1) é dominante e na outra a restrição de flambagem (m_2) domina. Nas duas regiões o objetivo é minimizar a massa. A estratégia de seleção retangular cujo vértice está sobre a linha $m_2 = m_1$. Quanto mais próximo o retângulo de seleção se aproxima da parte inferior esquerda, o valor de \tilde{m} diminui. Sendo assim o melhor candidato é o último material que sobra dentro do retângulo de seleção.

Já na figura 14 onde é representado o diagrama dos índices de mérito M_2 e M_1 a estratégia de seleção é a mesma de seleção retangular só que desta vez o vértice do retângulo está sobre a linha $M_2 = C_c \times M_1$. O valor de C_c é a constante de ligação e é desenvolvido igualando as restrições da massa definidas pelo projeto. Quanto mais próximo o retângulo de seleção se aproxima da parte inferior esquerda, o valor de \tilde{m}

diminui. Sendo assim o melhor candidato é o ultimo material que sobrar dentro do retângulo de seleção.

Figura 14-Análise gráfica, diagrama de



Fonte: Ashby (2005)

2.9.1 ESTRATÉGIAS DE SELEÇÃO DE PROCESSOS

Após a escolha do material, é necessário definir ainda o processo de fabricação que será utilizado. Ashby 2005 afirma que “um processo é um método de conformação, união ou acabamento de um material”, ou seja, são centenas de processos a serem designados. A seleção para um componente está relacionada com o material que ele será feito, com as suas dimensões e com o tamanho do lote, que são em resumo as restrições de projeto. Para selecionar um processo primeiramente é necessário classificá-lo.

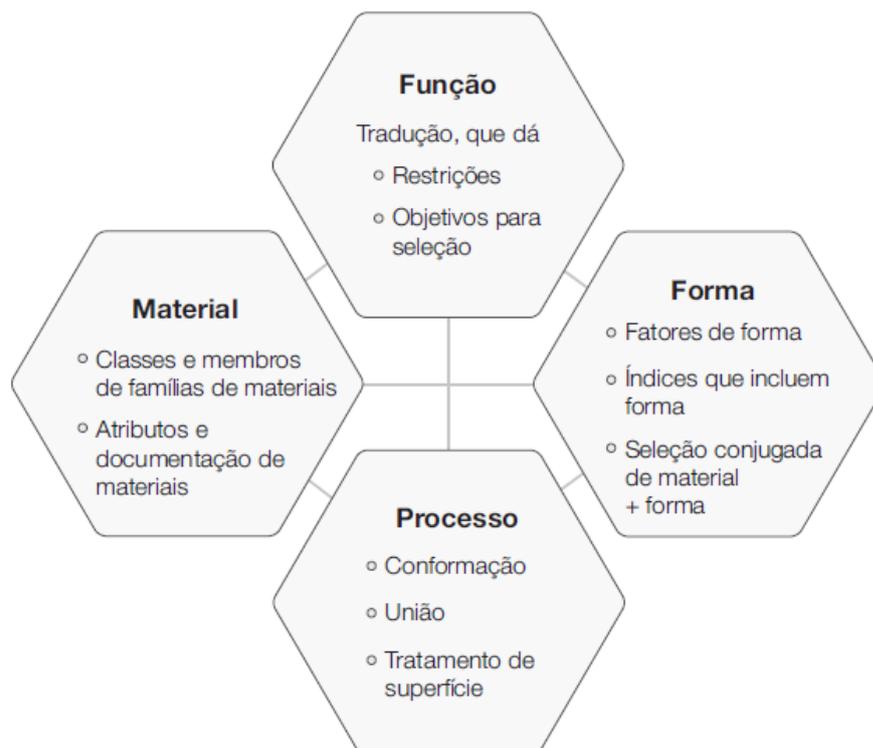
Segundo Ferrante (2002, p.162), critérios que estão relacionados com a escolha do processo adequado:

- Considerações dimensionais;

- Considerações de forma;
- Facilidade de fabricação;
- Número de unidades;
- Custo;
- Valor da sucata.

De acordo com Ashby 2005, material, forma e processamento estão conectados, dessa maneira as propriedades e as formas dos materiais acabam limitando a escolha do processo. Assim como os outros aspectos do projeto, a seleção de processos também é um procedimento interativo. Na figura 15 abaixo é demonstrado como função, material, forma e processo interagem entre si.

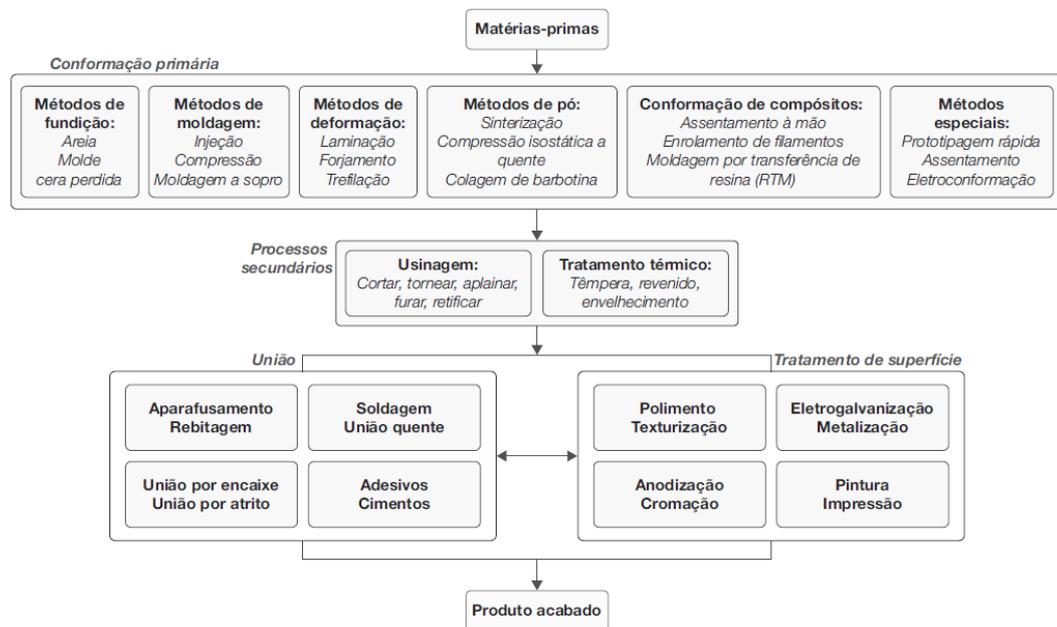
Figura 15 - Seleção de processos depende do material e forma



Fonte: Ashby (2005)

Para Ashby (2005) processos de fabricação podem ser classificados sob os títulos mostrados na figura 16.

Figura 16 - Classificação dos processos

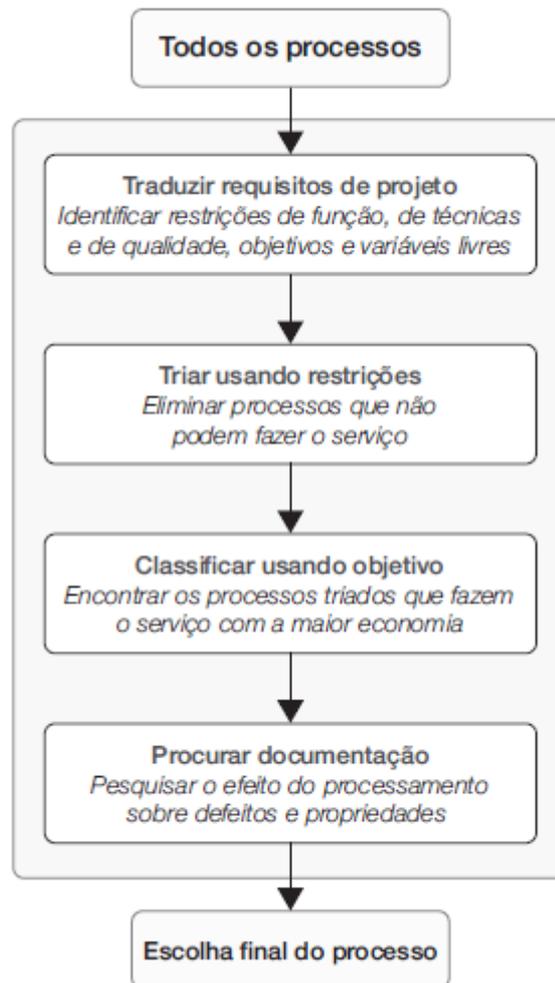


Fonte: Ashby (2005)

O primeiro nível indica os processos primários, que são aqueles realizados a partir da matéria prima, a conformação primária cria formas. Já os processos secundários são aqueles que modificam formas ou propriedades. No ultimo nível são apresentados os processos de união e tratamento da superfície ou acabamento.

Assim como na seleção de materiais, a mesma estratégia é utilizada na seleção de processos apresentada na Figura 17.

Figura 17 - Fluxograma para seleção de processos



Fonte: Ashby (2005)

Portanto, a primeira etapa é definir o horizonte no qual o produto está inserido, através da tradução dos requisitos do processo. A etapa de tradução fica melhor explicitada a partir da quadro 2 abaixo onde os requisitos do projeto são apresentados mais claramente.

Quadro 2 - Requisitos do processo

| | |
|------------------|--|
| Função | O que o processo deve fazer (Forma? Junção? Acabamento?) |
| Restrições | Quais limites técnicos deve cumprir? (Compatibilidade entre material e forma) Quais limites de qualidade deve obedecer? (Precisão, evitação de defeitos...) |
| Objetivos | O que deve ser maximizado ou minimizado? (Custo? Tempo? Qualidade?) |
| Variáveis livres | Escolha de processo e de condições de operação do processo |

Fonte: Ashby (2005)

Logo após a etapa de tradução é realizado o estágio de triagem onde são aplicadas as restrições, onde o objetivo é eliminar processos que não podem desempenhá-las. No estágio de classificação novamente o objetivo, dos quais a minimização do custo de processamento se torna interessante e é tomado como referencia para classificar os processos restantes da etapa de triagem, em alguns processos mais criteriosos o aumento da qualidade pode ser mais significativa independente do custo embora o mais usual seja uma permuta entre os dois objetivos. Na documentação outras questões são mais bem tratadas a fim de dar critério à escolha correta do processo.

2.9.2 BIELAS PARA MOTORES DE ALTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo Barros (2003) a biela é um componente que possui três funções que são elas: Conectar o pistão a ao virabrequim, transmitir as forças de pressão do gás da explosão no cilindro para o virabrequim e também tem a função de lubrificação do pino do pistão.

Nesse caso será estudada a biela do motor do protótipo com objetivo primordial de redução de massa do componente para assim reduzir as forças de inércia sobre o virabrequim, Barros (2003), e desse modo diminuir a energia necessária para o funcionamento do motor e conseqüentemente aumentar a eficiência energética do protótipo. Sendo assim bielas mais leves representam menor consumo energético de combustível.

De acordo com Lima e Silva (2013) bielas são componentes que comumente falham devido à fadiga de alto ciclo e por flambagem (estabilidade estrutural) essas falhas podem ocorrer tanto na viga da biela (corpo) quanto nos mancais do componente. Para uma efetiva seleção de materiais do componente biela, é necessário considerar essas duas restrições, não falhar por fadiga e nem falhar por flambagem.

2.9.3 MATERIAIS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE BIELAS

O quadro abaixo representa uma parcela dos materiais que são utilizados comumente para a fabricação de bielas.

Quadro 3- Materiais para fabricação de biela para motores

| Material | Aplicações | Referência |
|--|----------------------------|-------------------|
| Ti-6Al-4V (Liga de Titânio) | Motor do Acura NSX | Mallick (2010) |
| Metal matriz compósito (MMC) | Motor de carro de corrida | Mallick (2010) |
| Ligas de alumínio série 201.0 | Motores de pequenos carros | Mallick (2010) |
| AZ80 (Liga de Magnésio) | Motores de pequenos carros | Visser (2008) |
| Copósito (corpo de polímero reforçado com fibra de carbono e extremidade de titânio) | Daimler-Benz | Visser (2008) |
| Aço Carbono | Carros Comuns | Agarwal (2015) |
| Aço Forjado | Carros Comuns | Agarwal (2015) |
| Alumínio 360 | Carros Comuns | Agarwal (2015) |
| ALFASiC(Compósito de Alumínio reforçado com carbetto de Silício) | | Agarwal (2015) |
| Liga de berílio 25 | Motor de carro de corrida | Agarwal (2015) |
| Ferro Fundido | Motor de Scooter | Agarwal (2015) |
| CFRP(Epoxi/Fibra de carbono) | Motor de carro de corrida | Borovkaya (1994) |
| Fibra de Carbono 280 Gsm | | Ahmed(2014) |
| Aço C70 | | Barros (2003) |
| Alumec | Honda (Ciclo Atkinson) | Johansson (2010) |

Fonte: Autoria Própria

Esse quadro demonstra a quantidade de opções de materiais para bielas já produzidas e utilizadas em diversos tipos de aplicações. Esses dados vão ser relevantes na etapa do método analítico proposto por Ashby (2005). Na metodologia em questão o método analítico de seleção, que será discutido na etapa de resultados, utiliza um critério de pré-seleção que para esse estudo foi atribuídos os materiais que são comumente utilizados para fabricação de bielas.

3 METODOLOGIA

Para o estudo de caso desenvolvido, foi utilizada como referência a biela do motor monocilindro Branco do protótipo da equipe Pato a Jato (figura 18). Essa biela tem as medidas de largura de 6,7 mm, espessura de 3,8 mm e comprimento de 50 mm obtidos a partir de medição com paquímetro, dados importantes para serem utilizados no desenvolvimento do método analítico de seleção de materiais que será apresentada nos resultados.

Figura 18- Biela motor Branco



Fonte: Autoria Própria

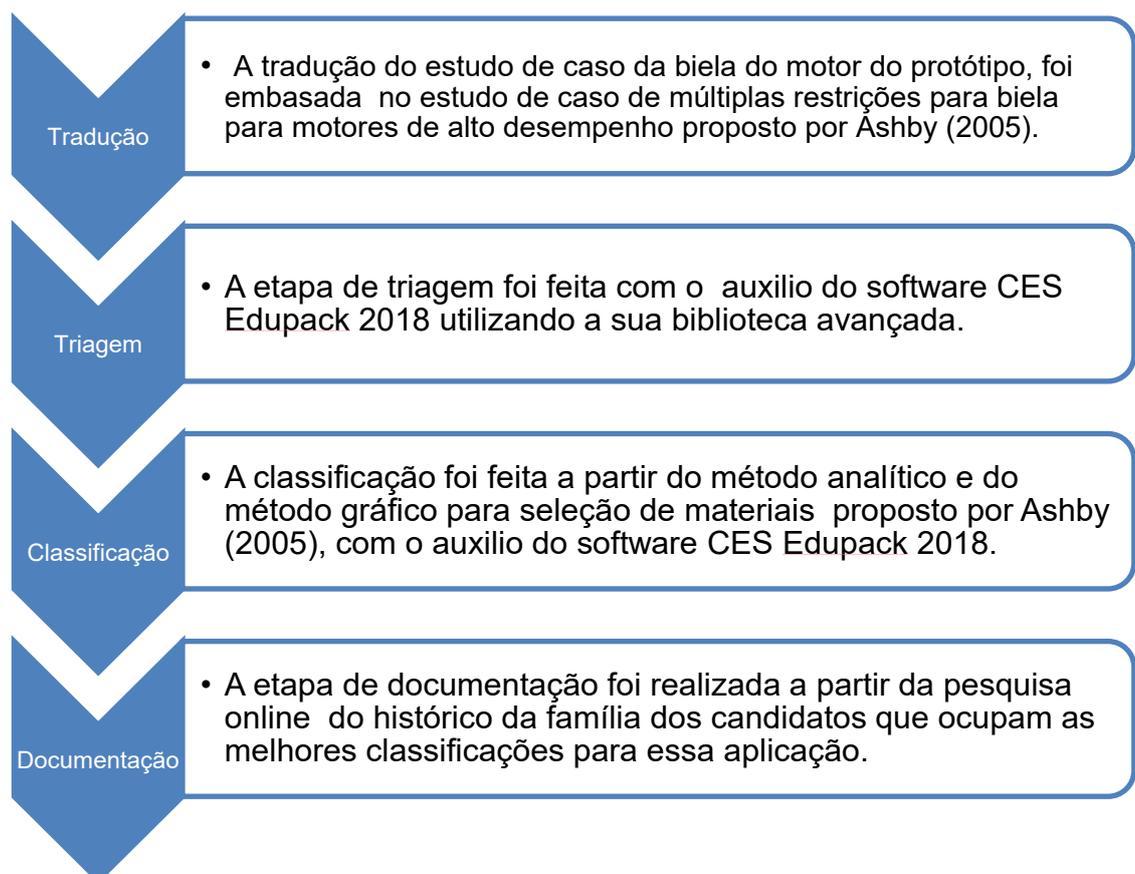
Com base no equacionamento contido em Toledo (2009) onde o carregamento atuante na biela considera a força estática aplicada pelos gases de combustão no pistão juntamente com os dados de pressão máxima na câmara de combustão, e diâmetro do pistão apresentados por Rodrigues (2011) foi possível estimar a força aplicada nesse componente com equacionamento descrito na etapa dos resultados, esses dados foram utilizados para obter as restrições de trabalho e condições iniciais para o componente biela com equacionamento que será apresentado nos resultados.

A seleção de materiais no componente biela tem a finalidade de melhorar o desempenho do veículo, a partir da redução da massa do próprio componente.

Sendo assim esse projeto é intitulado adaptativo onde segundo Ashby (2005) é o projeto que busca aperfeiçoar o desempenho com base na melhoria do princípio de funcionamento de um conceito que já existe. Com a finalidade de aprimorar ainda mais o protótipo da equipe no quesito eficiência energética o projeto poderia considerar dimensionar a biela para o motor de ciclo Atkinson que a partir dos resultados de Gomes se mostrou mais eficiente comparado ao ciclo otto.

A metodologia utilizada no trabalho é baseada no método de seleção de materiais e processos, desenvolvida por Ashby em 1992 e é ilustrada no fluxograma para seleção de materiais abaixo:

Figura 19- Fluxograma metodologia para seleção de materiais



Fonte: Adaptado Ashby (2005)

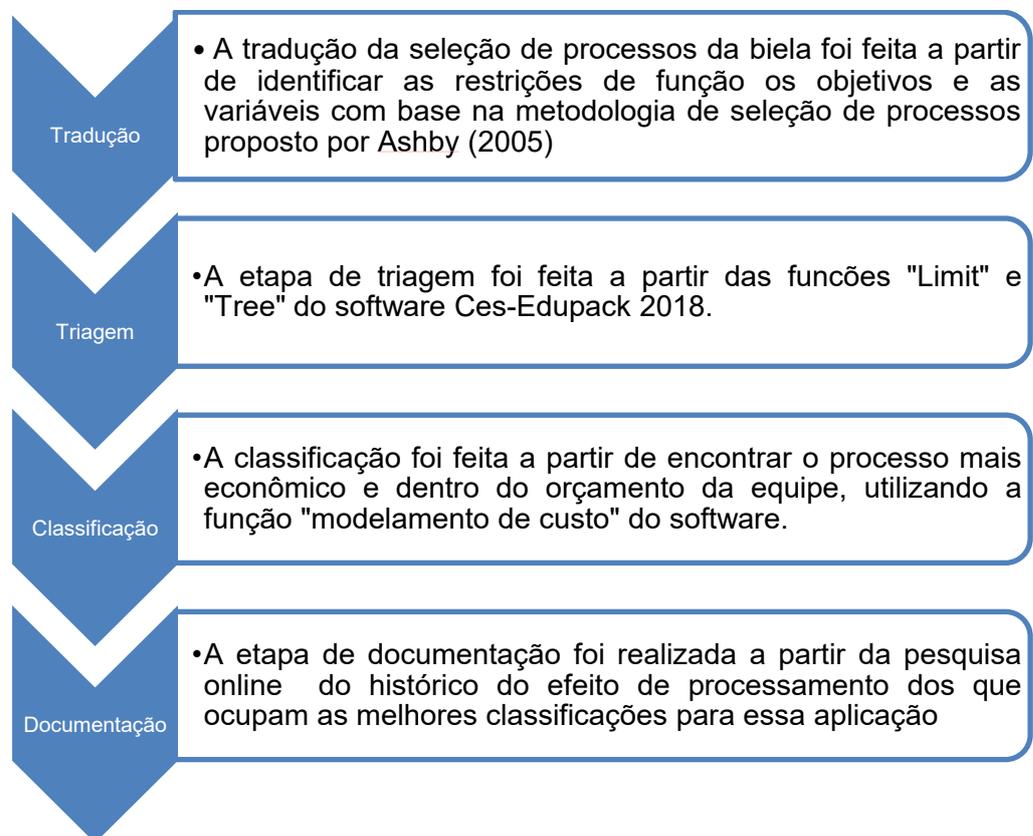
A etapa de triagem foi realizada utilizando o software Ces-Edupack (2018) para ser possível explorar as funções do software e permitir a visualização

de como a triagem se apresenta. Porém para a seleção utilizando o método analítico foi utilizado o quadro que apresenta os materiais que são comumente utilizados para a fabricação de bielas.

Para a etapa de classificação da seleção de materiais utilizando o método gráfico será realizada em 3 níveis, primeiramente para altos valores de carregamento estrutural logo em seguida para baixos valores e por fim, com intuito de complementar outros trabalhos da equipe, para valores associados ao projeto de uma biela que opera a partir do ciclo Atkinson. Todos os níveis vão ser apresentados na etapa de resultados.

Assim como na seleção de materiais, a mesma estratégia é utilizada na seleção de processos apresentada no fluxograma da Figura 20, a seleção de processos foi realizada nos materiais resultantes da seleção realizada com base nos valores de carregamento estrutural associado ao projeto de uma biela que opera a partir do ciclo Atkinson.

Figura 20- Fluxograma seleção de processos



Fonte: Adaptado Ashby (2005)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS NO PROJETO

O procedimento de seleção seguiu a metodologia proposta por Ashby que tem como base os mapas de propriedades dos materiais, que permitem comparar qualquer conjunto de materiais a partir de suas propriedades. A seleção dos materiais nesse atual trabalho foi inicialmente definida para componentes do motor, tendo em vista que pequenas otimizações obtidas nesses componentes garantem uma significativa melhora na eficiência do veículo em estudo.

O procedimento de seleção foi realizado no componente biela do motor do protótipo com objetivo primordial de minimizar a massa do componente para assim reduzir as forças de inércia sobre o virabrequim, Barros (2003), e desse modo diminuir a energia necessária para o funcionamento do motor e conseqüentemente aumentar a eficiência energética do protótipo. A biela é um componente que segundo Barros (2003) tem uma das suas funções, transmitir forças de pressão do gás no cilindro para a árvore de manivelas, ou seja, uma restrição é suportar esta carga sem falhar nem por fadiga, nem por flambagem elástica. Dessa forma no quadro 4 são traduzidos os requisitos do projeto.

4.2 TRADUÇÃO

Quadro 4- Requisitos do projeto

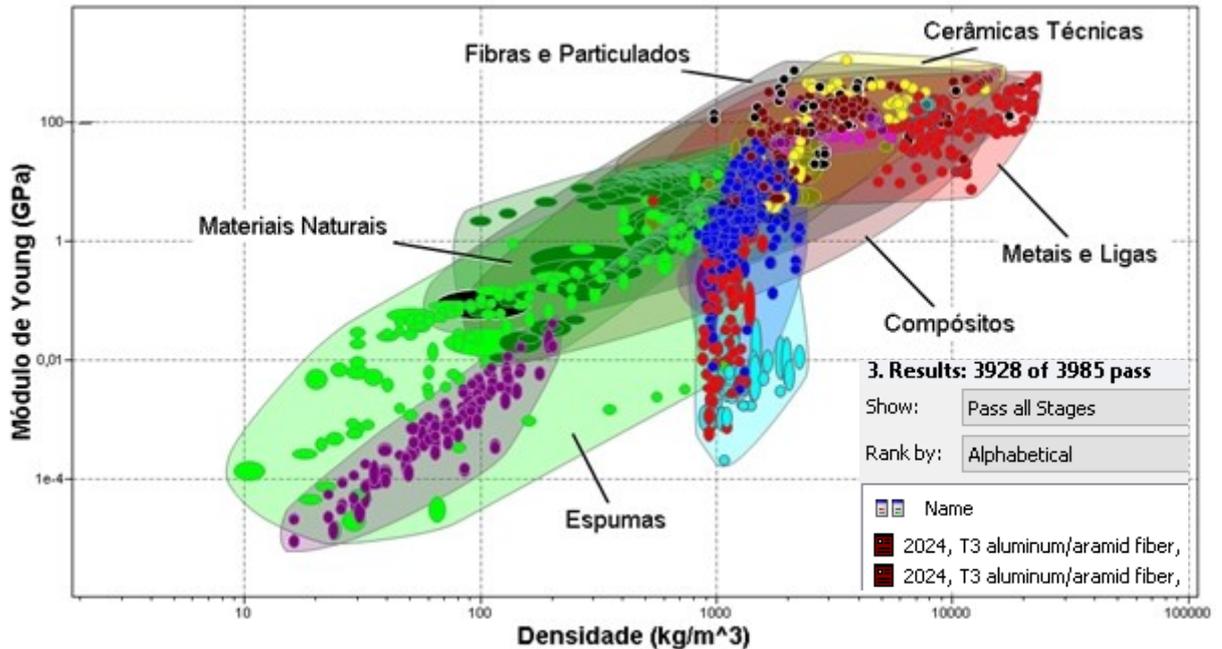
| | |
|-------------------------|---|
| Função | Conectar o pistão a árvore de manivelas (virabrequim), transmitir forças de pressão do gás no cilindro para árvore de manivelas (virabrequim) |
| Restrições | Não deve falhar por fadiga de alto ciclo. |
| | Não deve falhar por flambagem elástica. |
| | Comprimento L, especificado. |
| Objetivos | Redução de massa para assim reduzir as forças de inércia sobre o virabrequim. |
| Variáveis Livres | Escolha do material. |

Fonte: Autoria própria

4.3 TRIAGEM

A partir da figura 21 a seguir é possível perceber a quantidade de materiais disponíveis na biblioteca avançada do software Ces-Edupack 2018. Um universo de mais de 3900 candidatos para selecionar.

Figura 21- Diagrama Módulo de Young por densidade



Fonte: Ces Edupack 2018

Com objetivo de restringir mais o número de matérias disponível e assim facilitar o processo de seleção, foi desenvolvido a partir da equação abaixo um limite mínimo para a tensão limite de fadiga:

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_e \quad (3)$$

De acordo com Toledo (2009) o carregamento atuante na biela considera a força estática aplicada pelos gases de combustão no pistão. A partir dos dados obtidos por Rodrigues (2011):

$$Força_{pistão} = \rho \times A = (9 \times 10^6) \times \frac{\pi(33 \times 10^{-3})^2}{4} = 7,698 \text{ KN} \quad (4)$$

Onde:

ρ : Máxima pressão na câmara de combustão

$A: \frac{\pi D^2}{4}$: Área do pistão, onde D representa o diâmetro do pistão.

Utilizando a equação (3) em conjunto com a área da seção da transversal da biela do motor Branco da equipe Pato a Jato com as medidas de largura de 6,7 mm e espessura de 3,8 mm é encontrado um limite mínimo para a tensão de fadiga:

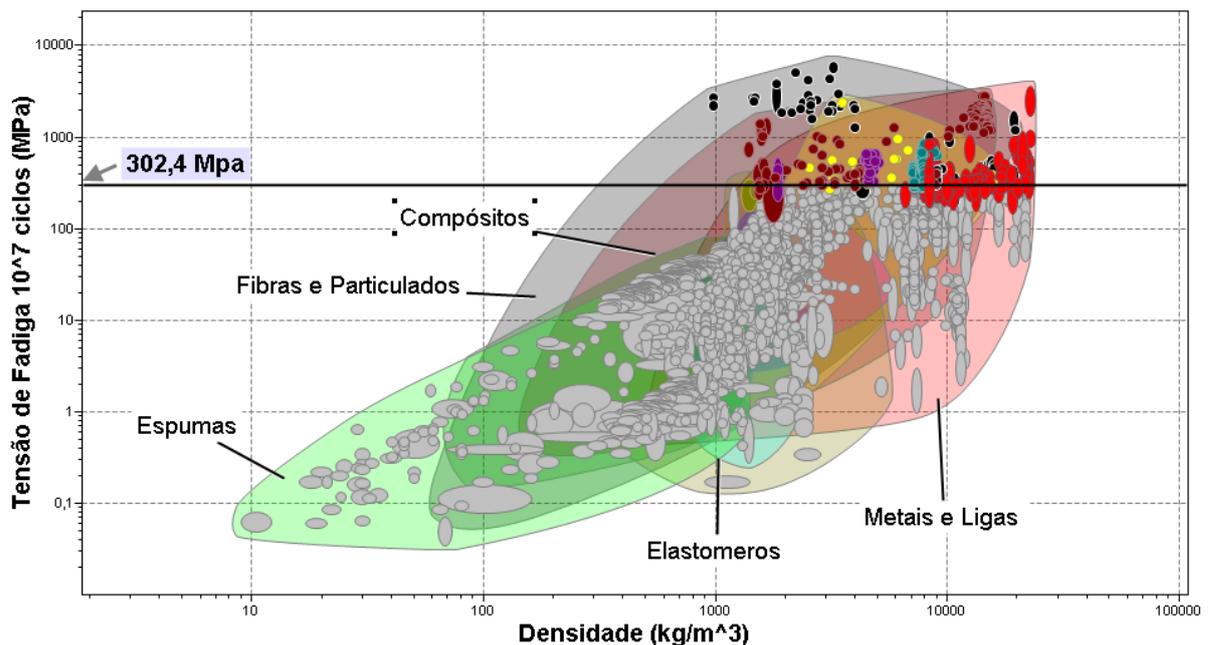
$$\frac{F}{A} \leq \sigma_e \quad (5)$$

$$\frac{7,698 \times 10^3}{(3,8 \times 10^{-3}) \times (6,7 \times 10^{-3})} \leq \sigma_e \quad (6)$$

$$302,36 \text{ MPa} \leq \sigma_e \quad (7)$$

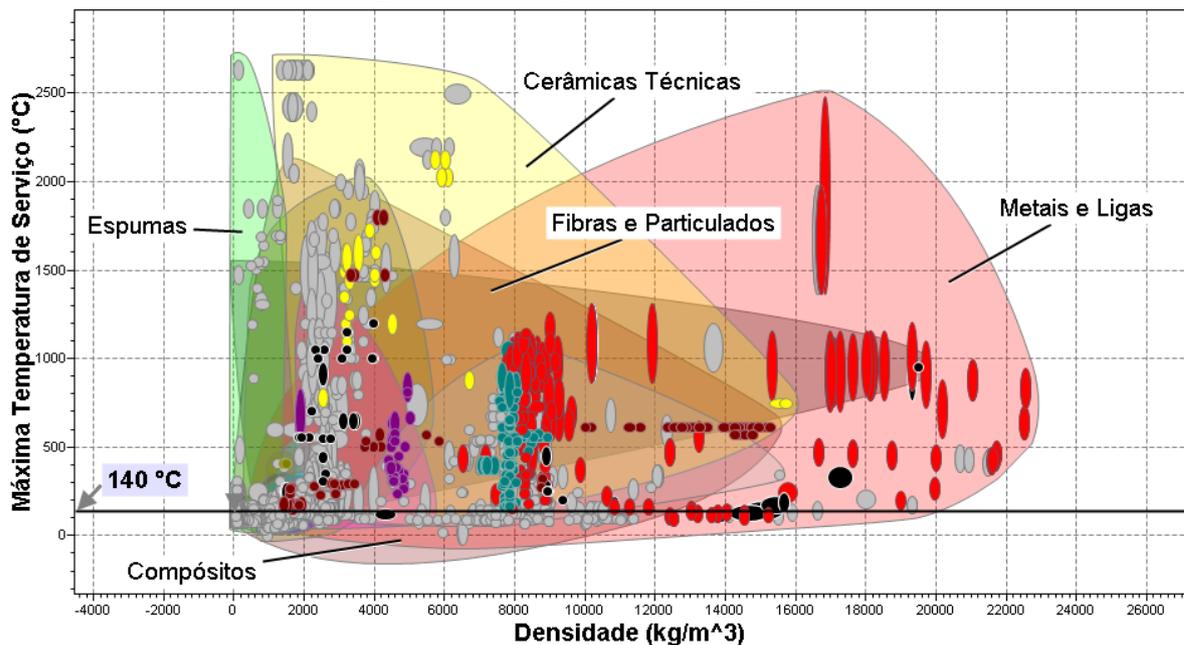
Continuando com o propósito de triar ainda mais e diminuir consideravelmente o número de candidatos foi levado em conta a partir de Furuhamma (1966) que a máxima temperatura de operação que a biela é submetida é de 140 ° C, a fim de triar possíveis polímeros que poderiam cumprir as outras restrições. Esses dois limites de triagem tanto o relacionado com a tensão de fadiga quanto o limite de temperatura foram adicionados ao software Ces-EduPack indicados nas figuras abaixo:

Figura 22- Restrição à fadiga



Fonte: Ces EduPack 2018

Figura 23- Restrição para a temperatura



Fonte: Ces Edupack 2018

Como se trata de um problema com mais de uma restrição a segunda restrição ligada a flambagem também é considerada na etapa da triagem. Com objetivo de restringir mais o número de matérias disponível e assim facilitar o processo de seleção, foi desenvolvido a partir da equação abaixo um limite mínimo para o módulo de Young:

$$F \leq \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \quad (8)$$

De acordo com Toledo (2009) o carregamento atuante na biela considera a força estática aplicada pelos gases de combustão no pistão. A partir dos dados obtidos por Rodrigues (2011):

$$Força_{pistão} = \rho \times A = (9 \times 10^6) \times \frac{\pi(33 \times 10^{-3})^2}{4} = 7,698 \text{ KN} \quad (9)$$

Onde:

ρ : Máxima pressão na câmara de combustão

$A: \frac{\pi D^2}{4}$: Área do pistão, onde D representa o diâmetro do pistão.

Utilizando a equação em conjunto com a área da seção da transversal da biela do motor Branco da equipe Pato a Jato com as medidas de largura de 6,7 mm e espessura de 3,8 mm e comprimento de 50 mm é encontrado um limite mínimo para o módulo de Young:

$$F \leq \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \quad (10)$$

Onde:

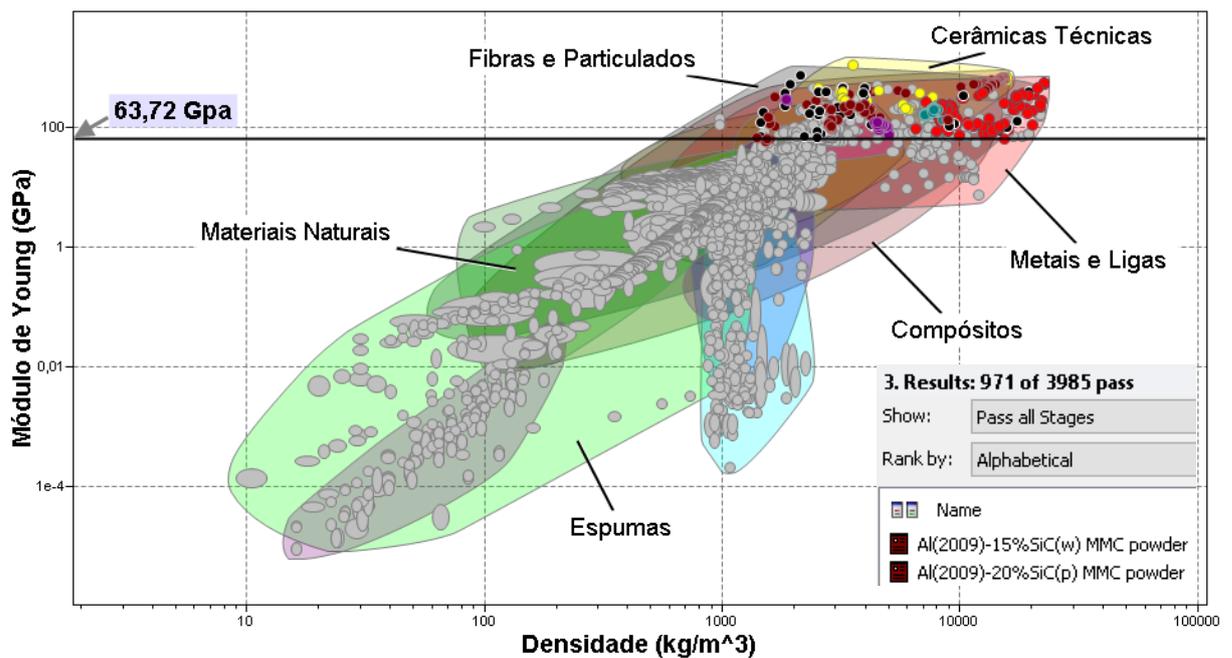
$I = \frac{b^3 \times w}{12}$; b= espessura da biela; w= largura da biela.

$$7,698 \times 10^3 \leq \frac{\pi^2 \times E \times (3,06 \times 10^{-11})}{(50 \times 10^{-3})^2} \quad (11)$$

$$63,723 \text{ GPa} \leq E \quad (12)$$

Na figura 24 abaixo é apresentado o diagrama para a restrição de flambagem estabelecida.

Figura 24- Restrição de flambagem



Fonte: Ces Edupack 2018

Após triar utilizando as restrições o número de candidatos reduziu para 971 os que atendem as restrições. Diminuindo consideravelmente o universo da biblioteca avançada do Ces-Edupack 2018 de quase 4000 materiais.

4.4 CLASSIFICAÇÃO

Existem diversos métodos para solucionar problemas mín-máx, mas para este caso será utilizado o método analítico proposto por Ashby (2005) para resolução de problemas com múltiplas restrições sendo confrontado e confirmado com o método gráfico logo em seguida.

O projeto é caracterizado com duas restrições, ou seja, para ser considerada solida, a biela devera atender aos requisitos tanto da restrição à fadiga quanto a restrição a flambagem ativa. De acordo com Ashby (2005) esse é um modelo de problema “min-max”, muito comum no ambiente da otimização. É preciso encontrar um mínimo valor de uma massa que é o máximo valor de duas ou mais equações (neste caso, índices de mérito).

Existem diversos métodos para solucionar problemas mín-máx, mas para este caso será utilizado o método analítico e o método gráfico proposto por Ashby (2005) para resolução de problemas com múltiplas restrições.

A finalidade, portanto, é obter um índice de mérito que satisfaça esses requisitos, e para isso foi preciso desenvolver uma equação que possua a variável a ser minimizada, que nesse caso é a massa do componente, relacionada com os requisitos funcionais os paramentos geométricos e as propriedades do material que Ashby (2005) denominou como função objetivo.

A função objetivo então é uma equação para a massa que aproximamos como:

$$m = \beta \times A \times L \times \rho \quad (13)$$

Onde L é o comprimento da biela, ρ a densidade do material do qual ela é feita, A a seção transversal do eixo e β um multiplicador constante que leva em conta a massa dos assentos nos mancais(Bronzinas), no livro texto do Ashby foi considerado o valor de 50% da massa do componente referente aos valores das bronzinas. Após pesar o componente do protótipo foi percebido que essa valor esta coerente para as condições do projeto visto que na biela do protótipo as bronzinas da biela representam até 30% do valor da massa, considerando que a biela do protótipo possui um comprimento quatro vezes menor do que a biela do estudo de caso proposto por Ashby (2005).

A primeira restrição à fadiga de alto ciclo requer:

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_e \quad (14)$$

No qual onde σ_e é o limite de fadiga do material do qual a biela é feita. Usando a equação (4) para substituir A na equação (3) obtemos a massa de uma biela que vai obedecer a primeira restrição para a fadiga de alto ciclo:

$$m_1 = \beta \times F \times L \times \left(\frac{\rho}{\sigma_e}\right) \quad (15)$$

Que abrange o índice de mérito:

$$M_1 = \frac{\rho}{\sigma_e} \quad (16)$$

A partir disso é possível perceber que a biela mais leve que vai resistir a restrição de fadiga de alto ciclo é a que possui o menor valor da razão $\left(\frac{\rho}{\sigma_e}\right)$, isto é, este é o indicador que deve ser minimizado. No diagrama da tensão de fadiga – densidade o inverso desse indicador deverá ser maximizado, portanto o índice de mérito é:

$$M_1 = \frac{\sigma_e}{\rho} \quad (17)$$

Substituindo na equação de massa (18) os valores de comprimento L, pelo obtido a partir da biela do motor Branco da equipe Pato a Jato. O valor da força F, encontrado a partir de Rodrigues (2011) e os valores de α e β definidos a partir do livro texto do Ashby. Resulta na equação descrita abaixo:

$$m_1 = \beta \times F \times L \times \left(\frac{\rho}{\sigma_e}\right) \quad (18)$$

onde o $\beta=1,5$ $F=7,698$ KN e $L=50$ mm

$$m_1 = (577,35) \times \left(\frac{\rho}{\sigma_e}\right) \quad (19)$$

Como se trata de um problema de múltiplas restrições, a segunda restrição a flambagem determina que a carga de compressão de pico F seja inferior a carga de flambagem de Euler:

$$F \leq \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \quad (20)$$

Com momento de inércia:

$$I = \frac{b^3 \times w}{12}$$

A partir do apêndice B (Ashby 2005). Tomando $b=\alpha w$, onde α é uma constante de forma que define as proporções da seção transversal, eliminando A da equação (13) temos uma segunda equação para a massa:

$$m_2 = \beta \left(\frac{12F}{\alpha \pi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times L^2 \left(\frac{\rho}{E^2} \right) \quad (21)$$

A partir disso é possível perceber que a biela mais leve que vai resistir à restrição de flambagem é a que possui o menor valor da razão $\left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right)$, isto é, este é o indicador que deve ser minimizado. No diagrama da tensão de módulo de Young – densidade o inverso desse indicador deverá ser maximizado, portanto o índice de mérito é:

$$M_2 = \frac{E^{1/2}}{\rho} \quad (22)$$

Substituindo na equação de massa (21) os valores de comprimento L , pelo obtido a partir da biela do motor Branco da equipe Pato a Jato. O valor da força F , encontrado a partir de Rodrigues (2011) e os valores de α e β definidos a partir do livro texto do Ashby. Resulta na equação descrita abaixo:

$$m_2 = \beta \left(\frac{12F}{\alpha \pi^2} \right)^{\frac{1}{2}} \times L^2 \left(\frac{\rho}{E^2} \right) \quad (23)$$

onde o $\beta=1,5$ $F=7,698$ KN e $L=50$ mm

$$m_2 = (0,4056) \times \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (24)$$

A tabela 2 a seguir foi construída a partir do quadro 3 da revisão de literatura representando os materiais que são comumente utilizados para a fabricação de bielas. A tabela ilustra as propriedades de densidade, módulo de Young, tensão de fadiga além dos valores resultantes da equação (18), massa m_1 de uma biela que atende especificamente a restrição de fadiga e também, a equação (21) da massa m_2 que será responsável pela segunda restrição de flambagem.

4.4.1 MÉTODO ANALÍTICO

Tabela 2- Materiais comumente utilizados para fabricação de bielas.

| Material | $\rho \frac{Kg}{m^3}$ | E Gpa | $\sigma_e MPa$ | $m_1 Kg$ | $m_2 Kg$ | $\tilde{m} = \max(m_1, m_2) Kg$ |
|--------------------------------------|-----------------------|-------|--------------------|----------|----------|---------------------------------|
| Fibra de Carbono 280 Gsm | $2,11 \times 10^3$ | 760 | $1,90 \times 10^3$ | 0,0006 | 0,0009 | 0,0009 |
| CFRP(Epoxy/ Fibra de carbono) | $1,57 \times 10^3$ | 121 | $1,08 \times 10^3$ | 0,0009 | 0,0018 | 0,0018 |
| Liga de Berílio 25 | $1,85 \times 10^3$ | 303 | 198 | 0,0054 | 0,0013 | 0,0054 |
| Liga Ti-6Al-4V | $4,43 \times 10^3$ | 114 | 661 | 0,0038 | 0,0053 | 0,0053 |
| Aço Carbono 1060 | $7,85 \times 10^3$ | 212 | 308 | 0,0014 | 0,0068 | 0,0068 |
| Liga de Magnésio AZ80 | $1,80 \times 10^3$ | 45 | 133 | 0,0078 | 0,0034 | 0,0078 |
| Liga de Alumínio 360 | $2,69 \times 10^3$ | 71 | 131 | 0,012 | 0,0040 | 0,012 |
| Ferro Fundido Nodular | $7,1 \times 10^3$ | 169 | 189 | 0,021 | 0,0070 | 0,021 |
| Alumec (Liga de alumínio serie 7000) | $2,8 \times 10^3$ | 73 | 160 | 0,007 | 0,0042 | 0,0042 |

Fonte: Autoria própria.

A quantidade de \tilde{m} indicado na ultima coluna é a maior entre as duas massas m_1 e m_2 referente a cada material. O material responsável pela biela mais leve é o que tem o menor valor associado a \tilde{m} . Neste caso são a fibra de carbono 280 Gsm, ligas de berílio 25 e o CFRP(Epoxy/ Fibra de carbono) os materiais com menores valores associados a \tilde{m} . Porem essa seleção não levou em conta os custos de fabricação e nem o processamento do material. Em seguida será apresentado o método gráfico para assim completar e confirmar os resultados obtidos a partir do método analítico de seleção de materiais.

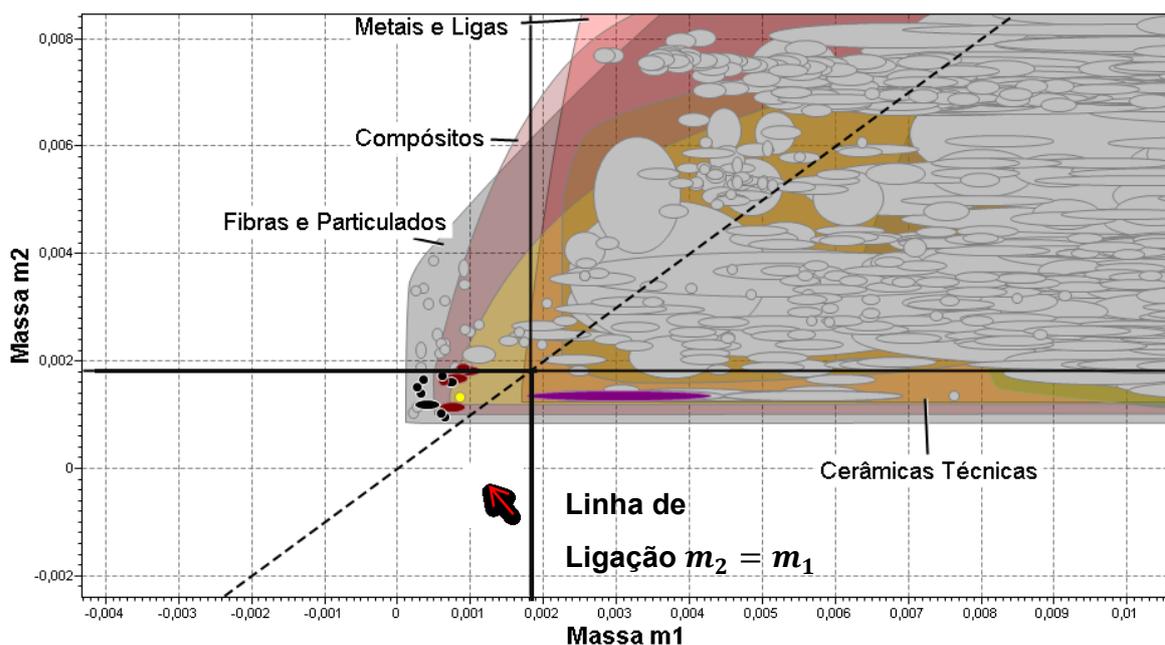
4.4.2 MÉTODO GRÁFICO

Segundo o Ashby (2005) o método analítico é um modo usar a seleção de material, mas não o melhor. Pois considera os resultados apenas nas condições de carga e comprimento já pré-estabelecidas na etapa de classificação.

Para resolver essa questão é necessário aplicar o método gráfico para confrontar e confirmar os candidatos obtidos a partir do método analítico.

Aplicando o método gráfico proposto por Ashby (2005) foi desenvolvido a partir do software Ces-Edupack 2018, o gráfico de m_2 (Equação 21) em relação à m_1 (Equação 18) ilustrado na figura 25 abaixo.

Figura 25- Diagrama $m_2 \times m_1$



Fonte: CES-Edupack 2018

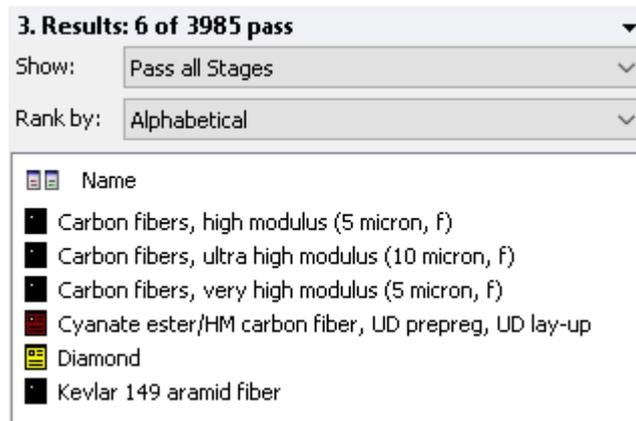
No diagrama cada bolha representa um material diferente, todas as variáveis (carregamento e comprimento) das equações de m_1 e m_2 são especificadas e as mesmas que foram utilizadas no método analítico deixando apenas o material para selecionar.

Como o objetivo da seleção é encontrar um candidato mais leve, é preciso selecionar os materiais em algum lugar próximo da parte inferior esquerda que segundo Ashby (2005) é onde o melhor candidato se apresenta.

A linha $m_2 = m_1$ divide o diagrama em duas regiões. Em uma delas a restrição de fadiga (m_1) é dominante e na outra a restrição de flambagem (m_2) domina. Nas duas regiões o objetivo é minimizar a massa. A partir disso foi definido a partir de Ashby (2005) uma seleção retangular cujo vértice esta sobre a linha $m_2 = m_1$. Quanto mais próximo o retângulo de seleção se aproxima da parte inferior esquerda, o valor de \tilde{m} diminui. Sendo assim o melhor candidato é o ultimo material que sobrar dentro do retângulo de seleção.

A figura 26 abaixo representa os resultados com retângulo de seleção deslocado até restar somente 6 candidatos dentro dele. A fibra de carbono de alto modulo (10 microns,f), a fibra de kevlar e o compósito de matriz polimérica(ester de cianato/fibra de carbono HM)são bons candidatos para escolha, além do diamante que foi inicialmente descartado devido a sua conhecida dificuldade de processamento e custo elevado.

Figura 26- Melhores Candidatos



Fonte: CES-Edupack 2018

Segundo Ashby (2005) a seleção utilizando o diagrama m_1 e m_2 é restrita para valores específicos de carga, comprimento e rigidez se essas condições fossem modificadas seria preciso desenvolver outro diagrama. Para não ser necessário desenvolver outro diagrama é necessário desenvolver o diagrama onde os eixos são os índices M_2 (Equação 22) e o M_1 (Equação 17)

A massa da biela que vai resistir às duas restrições de fadiga e flambagem é a maior massa entre m_1 e m_2 . Com isso é necessário igualar as duas equações de

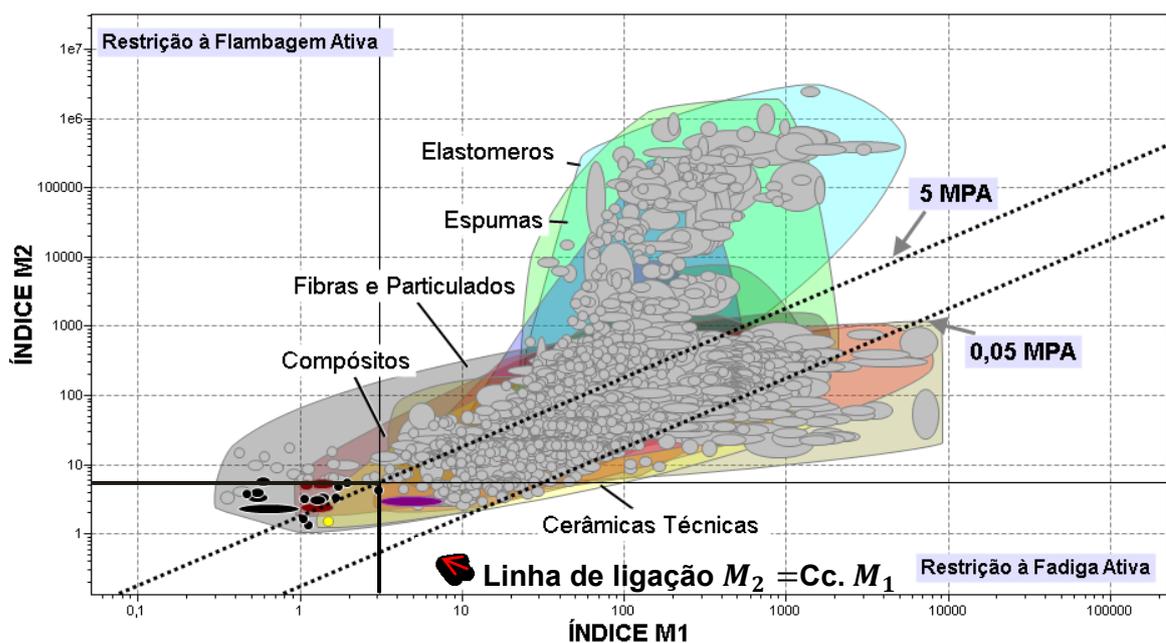
massa (equações 18 e 23), para obter a equação denominada por Ashby (2005) de equação da linha de ligação mostrada abaixo:

$$M_2 = \left[\left(\frac{\alpha \pi^2}{12} \times \frac{F}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \times M_1 \quad (25)$$

O valor de dentro dos colchetes é a constante de ligação C_c , onde o valor de α permanece 0,8 obtido a partir do livro base e também apresenta a quantidade do coeficiente de carregamento estrutural $\frac{F}{L^2}$, definido por Ashby (2005) que estabelece como uma medida de intensidade de carregamento com as dimensões de tensão e comprimento. Na figura 27 existem duas linhas de ligação a primeira onde o coeficiente de carregamento estrutural foi definido para o valor de 5 Mpa representando a faixa de grandes valores para esse coeficiente, e a seguinte onde o valor do carregamento estrutural é para pequenas valores e foi atribuído o de 0,05 Mpa para cálculo.

Alterando os valores de F e L, para condições específicas de um projeto, a posição da linha de ligação C_c é deslocada para o nível de $\frac{F}{L^2}$ resultante, ou seja, é possível adaptar a altura da linha de ligação a condição desejada, o que torna a seleção mais flexível.

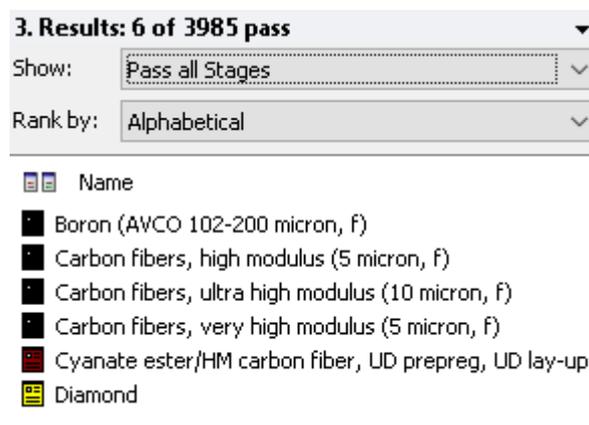
Figura 27- Diagrama $M_2 \times M_1$



Fonte: CES-Edupack 2018

Considerando somente os materiais contidos na linha com o alto valor de 5 Mpa para o coeficiente de carregamento estrutural, a mesma estratégia de seleção do diagrama das massas foi utilizada, um retângulo onde seu vértice está sobre a linha de ligação e quanto mais próxima da parte inferior esquerda menor o valor de \tilde{m} . A figura 28 abaixo apresenta os resultados com o retângulo deslocado até na parte mais inferior esquerda do diagrama até restar somente 6 candidatos para selecionar.

Figura 28- Melhores Candidatos

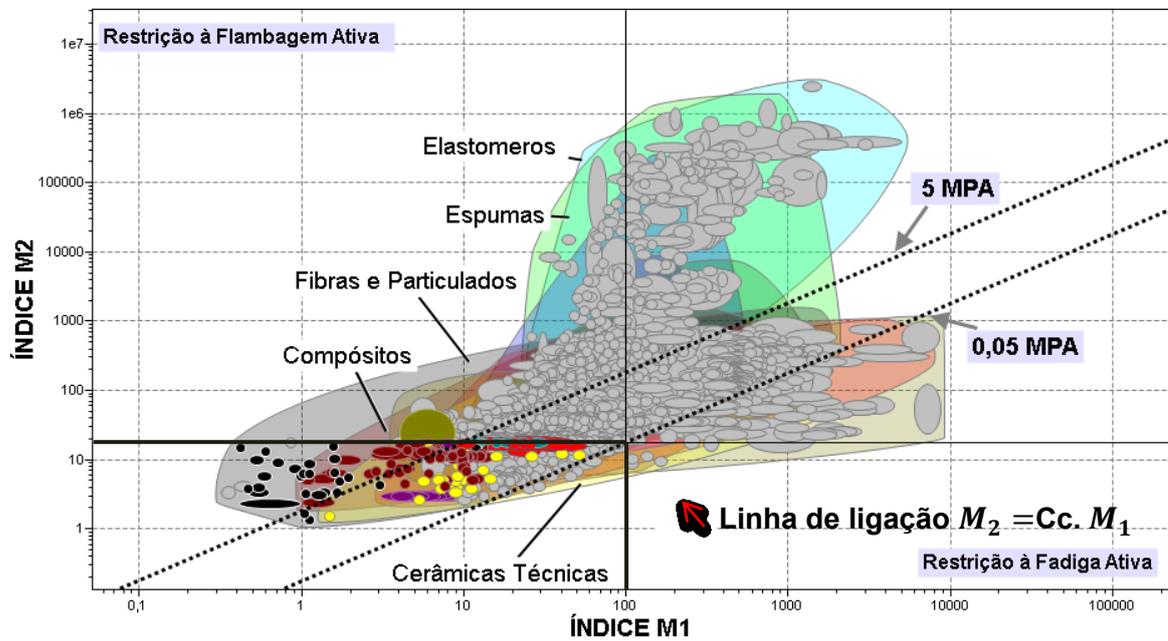


Fonte: CES-Edupack 2018

Novamente a fibra de carbono de alto modulo (10 microns,f) e o compósito de matriz polimérica(ester de cianato/fibra de carbono HM) são bons candidatos para escolha, a fibra de boro também foi outra opção dessa vez. De novo o diamante foi inicialmente descartado devido a sua conhecida dificuldade de processamento e custo elevado.

Considerando agora a segunda linha de ligação no diagrama da figura 27 composta dessa vez pelo baixo valor de 0,05 Mpa atribuído ao valor carregamento estrutural, apresentado no diagrama da figura 29:

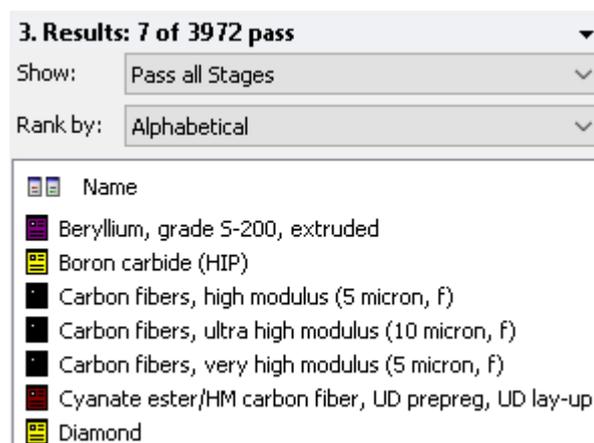
Figura 29- Seleção atribuída aos valores do carregamento estrutural igual a 0,05 Mpa



Fonte: CES-Edupack 2018

Utilizando a mesma estratégia de seleção realizada anteriormente, um retângulo onde seu vértice está sobre a linha de ligação e quanto mais próxima da parte inferior esquerda menor o valor de \tilde{m} . A figura 30 abaixo demonstra o resultado com retângulo na parte mais próxima inferior esquerda do diagrama até restar somente 7 candidatos para selecionar, para considerar uma liga não ferrosa dessa vez como opção.

Figura 30- Melhores Candidatos



Fonte: CES-Edupack 2018

A seleção com o menor valor atribuído ao coeficiente de carregamento estrutural igual de 0,05 Mpa resultou em opções como a liga de berílio S-200, novamente a fibra de carbono de alto módulo e o compósito de matriz polimérica (éster de cianato/fibra de carbono HM), além das cerâmicas técnicas diamante e carbetos de boro.

Para os gráficos gerados a partir dos índices atrelados a fadiga e a flambagem, foi classificado a partir do software Ces-Edupack 2018 boas alternativas para a otimização do projeto e fabricação da biela do motor do protótipo da equipe. No tópico seguinte será desenvolvida a seleção de processos para assim obter a escolha definitiva do material para a biela.

A fim de incrementar e refinar ainda mais o projeto e melhorar a eficiência energética do protótipo foi desenvolvido também um diagrama de M_2 por M_1 onde o valor atribuído para o carregamento estrutural $\frac{F}{L^2}$, com o valor da força o mesmo obtido a partir do equacionamento de Toledo (2009) juntamente com os dados da tese de Rodrigues (2011) já demonstrados na equação (3) na etapa anterior de triagem, e o valor do comprimento obtido através de Colombo (2018) e é referente ao comprimento de uma biela projetada para o ciclo Atkinson ilustrado na figura 31 abaixo para ser utilizado na equação da linha de ligação.

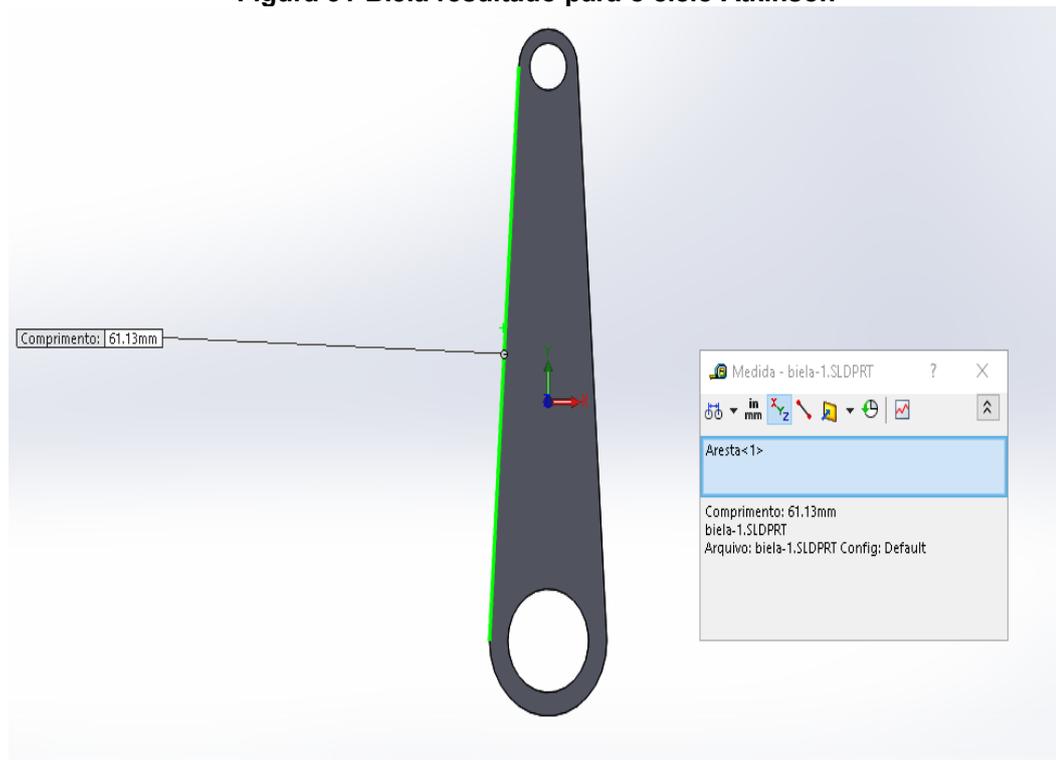
Sendo assim o carregamento estrutural obtido para esse diagrama resulta na equação descrita abaixo:

$$\frac{7,698 \text{ KN}}{(61,13 \text{ mm})^2} = 2,60 \text{ Mpa} \quad (26)$$

Utilizando esse valor juntamente com o mesmo valor de $\alpha=0,8$ foi possível encontrar a constante de ligação para a reta de ligação para esse diagrama, demonstrada abaixo:

$$M_2 = [1,31] \times M_1 \quad (27)$$

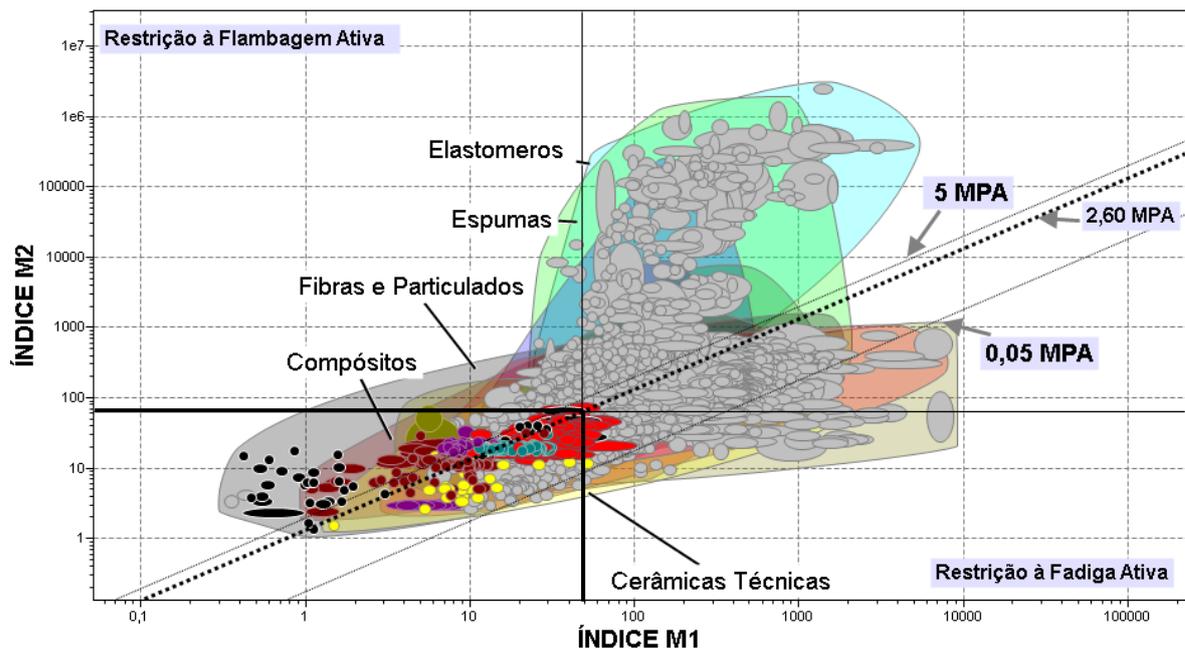
Figura 31-Biela resultado para o ciclo Atkinson



Fonte: Colombo (2017)

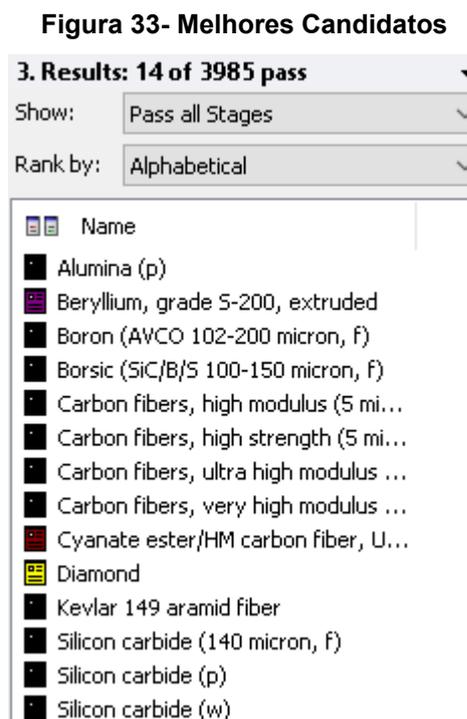
Apresentado na figura 32 abaixo o diagrama de $M_2 \times M_1$ com a seleção atribuída aos materiais que estão dentro do faixa atribuído para o coeficiente de carregamento estrutural igual 2,60 Mpa.

Figura 32-Seleção atribuída aos valores do carregamento estrutural igual a 2,60 Mpa



Fonte: CES-Edupack 2018

Utilizando a mesma estratégia de seleção anterior, um retângulo onde seu vértice esta sobre a linha de ligação e quanto mais próxima da parte inferior esquerda menor o valor de \tilde{m} . A figura 33 abaixo demonstra o resultado com retângulo na parte mais próxima inferior esquerda do diagrama até restar somente 14 candidatos para selecionar, o número de candidatos aumentou para considerar novamente uma liga não ferrosa como opção.



Fonte: CES-Edupack 2018

A partir do diagrama desenvolvido foi possível observar que a faixa de valores de 2,60 Mpa está dentro da faixa de valores já definidas entre 5 Mpa e 0,05 Mpa atribuídos inicialmente para o valor do coeficiente de carregamento estrutural. Sendo assim a seleção é representativa também para essas condições específicas de projeto.

4.5 DOCUMENTAÇÃO

Após realizar a etapa de classificação foi feita a etapa de documentação onde os melhores candidatos selecionados, a partir dos métodos analíticos e gráficos propostos por Ashby (2005), que são eles: fibra de carbono de alto módulo, liga de berílio S200, compósito de matriz polimérica (Ester de cianeto/fibra de carbono) e as fibras de boro e kevlar foram pesquisados em relação a seu histórico de utilização do material para a fabricação de bielas.

A fibra de carbono se mostra a mais leve e ainda assim atende as restrições de fadiga e flambagem exigidas para a biela, existem históricos de algumas bielas projetadas em fibra, a sua prototipagem é mais complexa e o custo do processo mais elevado.

De acordo com Ahmed (2014) o material composto como a fibra de carbono tem boa resistência e pode ser usado para fabricação de bielas.

O compósito de matriz polimérica (Ester de cianeto/fibra de carbono) representa uma boa escolha para o objetivo de redução de massa, resultados como os apresentados em Borovskaya (1994) demonstram a utilização da fibra de carbono juntamente com uma matriz compósita para fabricação de bielas automotivas, que apresentaram uma redução de até 30% de peso quando comparadas as bielas fabricadas em aço.

Visser (2008) em seu trabalho demonstrou que é possível obter uma significativa redução de peso com manutenção da resistência sob cargas de operação pela fabricação de uma biela híbrida, composta em seu corpo por um compósito polimérico reforçado com fibra de carbono e com uma liga de titânio nas suas extremidades, quando comparadas as bielas forjadas de aço.

As Liga de Berílio 25 apresentam uma boa alternativa, porém com custo elevado de material. Agarwal (2015) demonstra a utilização da liga berílio para a fabricação de bielas permite vida útil mais longa devido ao mínimos valores de tensão, deformação e deslocamento comparado a outros materiais no estudo no caso Al 360, aço forjado, aço carbono, ligas de magnésio.

As fibras de kevlar e boro não foram encontradas registros de bielas fabricadas com esses materiais. A seleção de materiais apresentou boas escolhas para o objetivo de redução de massa da biela e vai ser completa a partir da seleção de processos de fabricação realizada no tópico seguinte.

4.6 SELEÇÕES DE PROCESSOS

Logo após realizar a seleção de material é necessário realizar a seleção dos processos de fabricação para os materiais mais qualificados a fim de obter os processos que podem ser mais econômicos ou que podem apresentar melhor qualidade em relação a outros processos.

4.6.1 TRADUÇÃO

A biela é uma forma sólida tridimensional para ser fabricada em um compósito, uma fibra e uma liga não ferrosa. Para o projeto sabemos que a sua massa é 0,033 kg e sua seção mínima é de 3,8 mm a partir de dados obtidos a partir de medições feitas na biela do motor Branco da equipe (figura 18).

Esses dados foram inseridos no software Ces-Edupack 2018 na função “Limit” utilizando a biblioteca de processos, ilustrado na figura 34, com objetivo de restringir os processos que não vão conseguir realizar a fabricação do componente.

Figura 34- Interface da seleção de processos no software Ces-Edupack 2018

Solid 3-D, Mass range, Range of section thickness, Primary shaping processes, Discrete 

Settings Apply Clear

▼ Shape

Circular prismatic

Non-circular prismatic

Flat sheet

Dished sheet

Solid 3-D

Hollow 3-D

▼ Physical attributes

| | Minimum | Maximum | |
|----------------------------|----------------------|----------------------|-----|
| Mass range | <input type="text"/> | 0,0336 | kg |
| Range of section thickness | <input type="text"/> | 3,8 | mm |
| Tolerance | <input type="text"/> | <input type="text"/> | mm |
| Roughness | <input type="text"/> | <input type="text"/> | µm |
| Cutting speed | <input type="text"/> | <input type="text"/> | m/s |
| Minimum cut width | <input type="text"/> | <input type="text"/> | mm |

▼ Process characteristics

Primary shaping processes

Secondary shaping processes

Machining processes

Cutting processes

Prototyping

Discrete

Continuous

Fonte: CES-Edupack 2018

A partir dos parâmetros de massa e forma pré-estabelecidos acima os resultados dos processos que atendem pelo menos um material dos candidatos selecionados para a faixa de 2,60 Mpa para esses requisitos e possibilitam a fabricação de uma biela são demonstrados abaixo.

Figura 35- Processos resultantes

3. Results: 14 of 145 pass ▼

Show: Pass all Stages ▼

Rank by: Alphabetical ▼

| Name |
|--|
|  BMC molding |
|  Cold closed die forging |
|  CVD |
|  Die pressing and sintering |
|  Electroforming (micro) |
|  Electroforming (small-scale) |
|  Hipping, small-scale |
|  Hot closed die forging |
|  Injection molding (thermoplastics) |
|  Injection molding (thermosets) |
|  Investment casting, manual |
|  Powder injection molding |
|  Precision glass molding |
|  SMC molding |

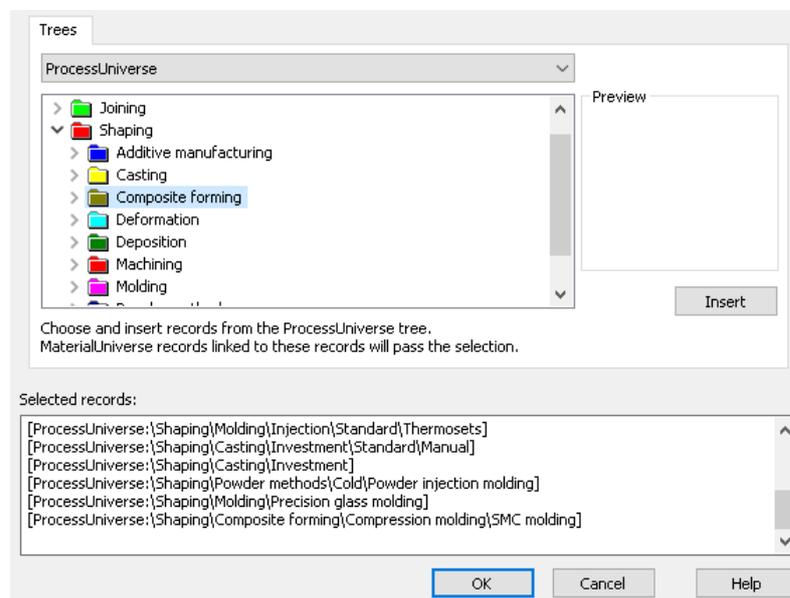
Fonte: CES-Edupack 2018

Segundo Ashby (2005) material, forma e processo estão interligados mutuamente. Então para interligar os materiais selecionados após a etapa de classificação, a partir dos diagramas de $M_2 \times M_1$ já desenvolvidos, cada processo de fabricação que foi encontrado acima, utilizando a função “Tree” do software Ces-Edupack2018, em seu universo de processos para assim restringir os processos que não atendem a fabricação de pelo menos um candidato a ser selecionado.

4.6.2 TRIAGEM

A figura abaixo apresenta a interface “Tree” do software para adicionar os processos de fabricação nos diagramas já desenvolvidos de M_2 por M_1 com a faixa atribuída de 2,60 Mpa para o coeficiente de carregamento estrutural, a fim de confrontar as escolhas selecionadas.

Figura 36- Interface do software Ces-Edupack 2018



Fonte: CES-Edupack 2018

Após inserir cada um dos processos no software, foi reduzido para apenas 3 os processos que conseguem fabricar a biela com pelo menos um material que foi candidato para a seleção.

Os três processos restantes que são eles, forjamento a frio, forjamento a quente e o hipping que se trata de processo de pressão isostática a quente, são

atribuídos para fabricar uma biela de berílio. Os processos são definidos no quadro 5 abaixo a partir da própria biblioteca do Ces-Edupack 2018.

Quadro 5- Definição dos processos de fabricação resultantes

| Processo | Definição |
|-----------------------------|---|
| Forjamento Fechado à Frio | <p>O processo forjamento fechado a frio, um lingote ou um tarugo é colocado em uma matriz e é moldado por meio de forças compressivas localizadas exercidas por um martelo ou prensa.</p> <p>Forjamento a frio produz componentes com melhor precisão e acabamento superficial, e maior resistência do que os forjados a quente. No entanto, são necessárias forças superiores para deformações que exijam equipamentos mais potentes. O processo é geralmente realizado à temperatura ambiente, mas, em alguns casos, é feito a temperaturas intermediárias elevadas para proporcionar maior ductilidade.</p> |
| Forjamento Fechado à Quente | <p>No processo de forjamento de matriz fechada a quente, forma-se uma peça em com sua forma bruta aquecida por meio de um único curso de compressão por meio de martelo ou prensa utilizando matrizes fechadas. Diversas vezes uma sucessão de moldes é usada para atingir a forma final ou quase final.</p> <p>Forjamento a quente é realizado acima da recristalização devido ao refinamento do grão, redução da porosidade e quebra das inclusões o processo produz um fluxo de grão altamente orientado e propriedades mecânicas anisotrópicas que podem ser alinhadas para proporcionar propriedades mecânicas melhoradas na direção das tensões de serviço principais.</p> <p>O processo é capaz de tolerâncias relativamente apertadas (melhor que o forjamento de matriz aberta).</p> |

| | |
|--------------------------------------|--|
| <p>Hiping(Hot IsostaticPressing)</p> | <p>A prensagem isostática a quente é um processo de desenvolvimento em pó no qual a prensagem e a sinterização são realizadas simultaneamente.</p> <p>O pó é selado em um recipiente de metal deformável e submetido a um ambiente de alta temperatura, alta pressão (1100C, 200MPA).</p> <p>O equipamento consiste de um vaso de pressão, dentro do qual há um forno em torno do recipiente no qual o pó é carregado. O argônio é usado como meio de pressurização.</p> <p>A principal vantagem da hiping é sua capacidade de produzir componentes 100% densos e com propriedades isotrópicas uniformes. É um processo relativamente caro, e é usado principalmente para aplicações onde a integridade do material é de primordial importância.</p> |
|--------------------------------------|--|

Fonte: Ces Edupack (2018)

Dentre as 14 opções apresentadas na figura 33 os melhores candidatos como os compósitos e as fibras não foram possíveis fabricar de acordo as restrições do software para cada processo de fabricação em relação às condições de massa e forma definidas na figura 35. Ou seja, devido ao tamanho e a massa da biela estudada o software não conseguiu encontrar em sua base de dados um tipo de processo que fabricasse a biela nas dimensões pré-estabelecidas para materiais com as fibras e os compósitos, restando somente a Liga de Berílio S-200 como opção para a fabricação da biela.

4.6.3 CLASSIFICAÇÃO

Por se tratar de uma equipe de eficiência energética com recursos financeiros limitados a classificação do melhor processo será atribuída ao de menor custo de fabricação por lote. Novamente foi utilizado o software Ces- Edupack 2018 utilizando a função “modelamento de custo” para cada um dos processos selecionados.

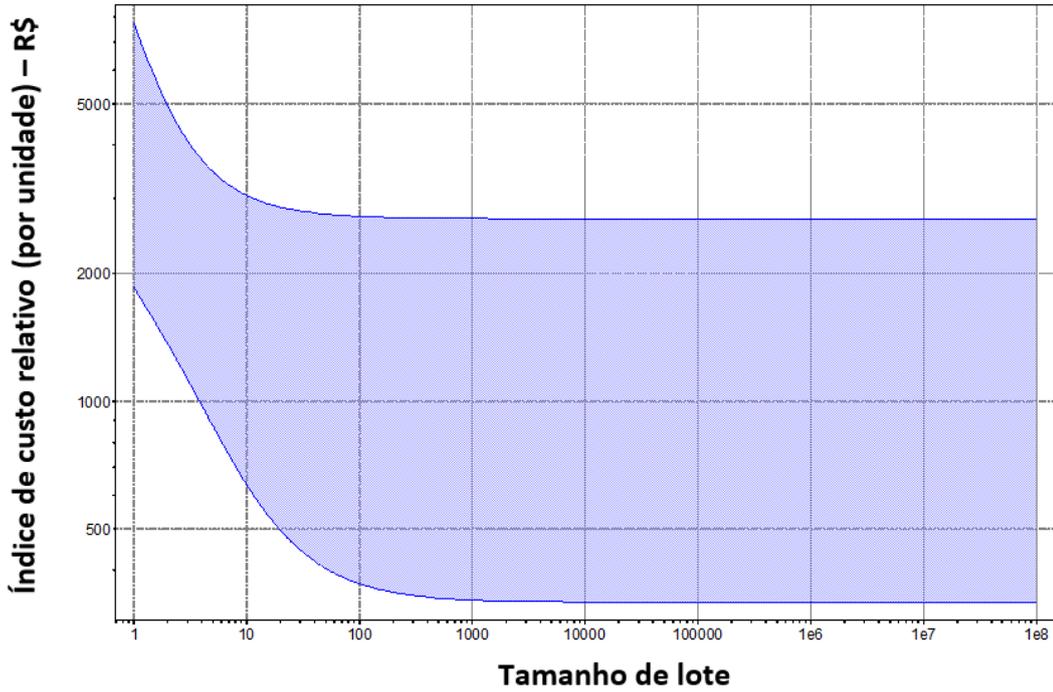
4.6.3.1 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica do processo de fabricação considerando o tamanho do lote, em termos do número de peças a serem produzidas, será utilizada para classificar e por fim selecionar os processos em termos de custo. No trabalho em questão, o número de peças a serem produzidas é muito pequeno, em torno 1 – 5 peças, considerando que seriam necessárias peças de reposição. Nas figuras 37, 38 e 39 é possível identificar a relação do índice de custo relativo pelo tamanho do lote (unidades de peças) para os processos de HIP, forjamento a frio em matriz fechada e forjamento a quente em matriz fechada respectivamente.

O índice de custo relativo é um valor composto pelo custo do material, custo capital (investimento inicial para aquisição do equipamento), custo do ferramental (molde, matriz e etc), levando em consideração a fração de material utilizado (que é a fração do material empregado que realmente se torna parte da peça), a vida útil do ferramental (em unidades), a taxa de produção (peças/hora). Todos esses valores são fornecidos pela base de dados do software CES EduPack 2018. Os valores de massa do componente (0,0336kg) e custo do material (R\$1635) foram dados de entrada. Outros índices como a taxa de desconto (5%), os custos indiretos (476 reais/h), o tempo para retorno do capital (5 anos), e a taxa de ocupação, porcentagem do tempo que o equipamento fica em uso, (0,5) foram utilizados como valores padrões sugeridos pelo software.

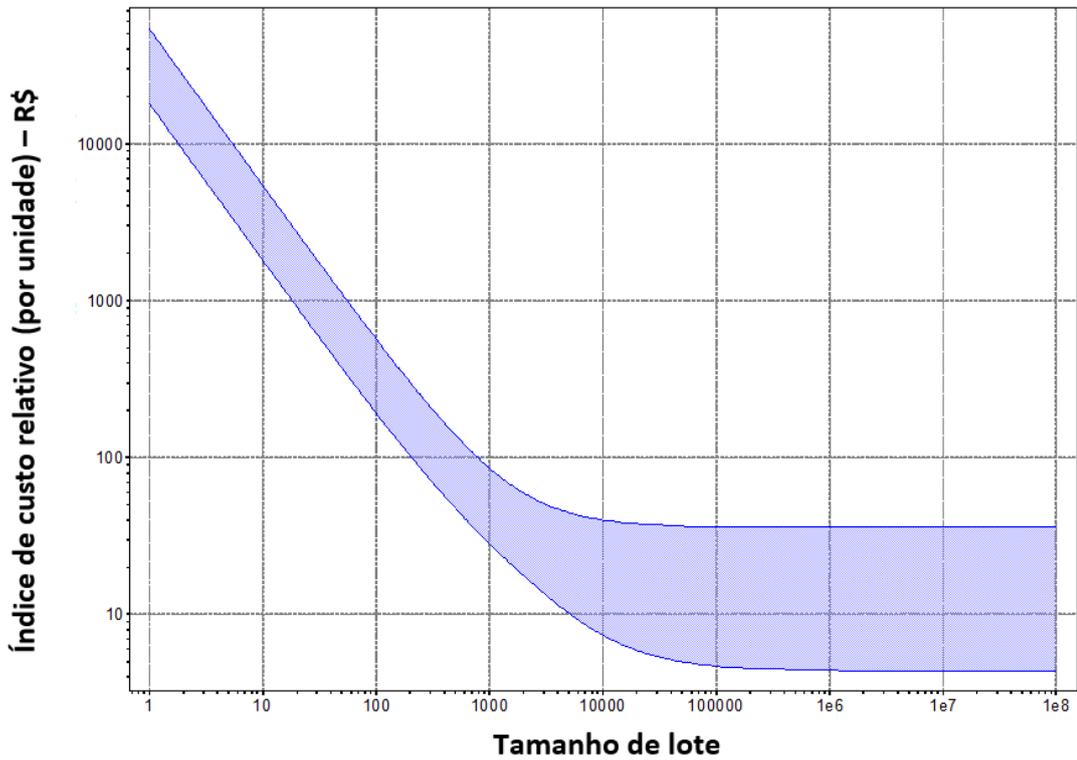
Analisando os gráficos (escala logarítmica) das figuras 37, 38 e 39 é possível observar que para tamanhos de lotes pequenos, o processo mais viável é o HIP com a faixa de custo iniciando no valor de R\$ 1800,00, devido ao seu menor investimento inicial para a aquisição do equipamento e menor custo do ferramental. Os processos de forjamento a frio em matriz fechada (R\$ 18.000,00) e forjamento a quente em matriz fechada (R\$ 24.000,00), ficam em segundo e terceiro lugar respectivamente em termos de lotes econômicos. Para todos os processos foi considerado, para fins de comparação, a produção de uma única peça. Quando o tamanho do lote se torna maior o custo do equipamento e ferramental é diluído e os processos de conformação por forjamento passam a se tornar interessantes.

Figura 37– Índice de custo relativo pelo tamanho do lote para o processo HIP



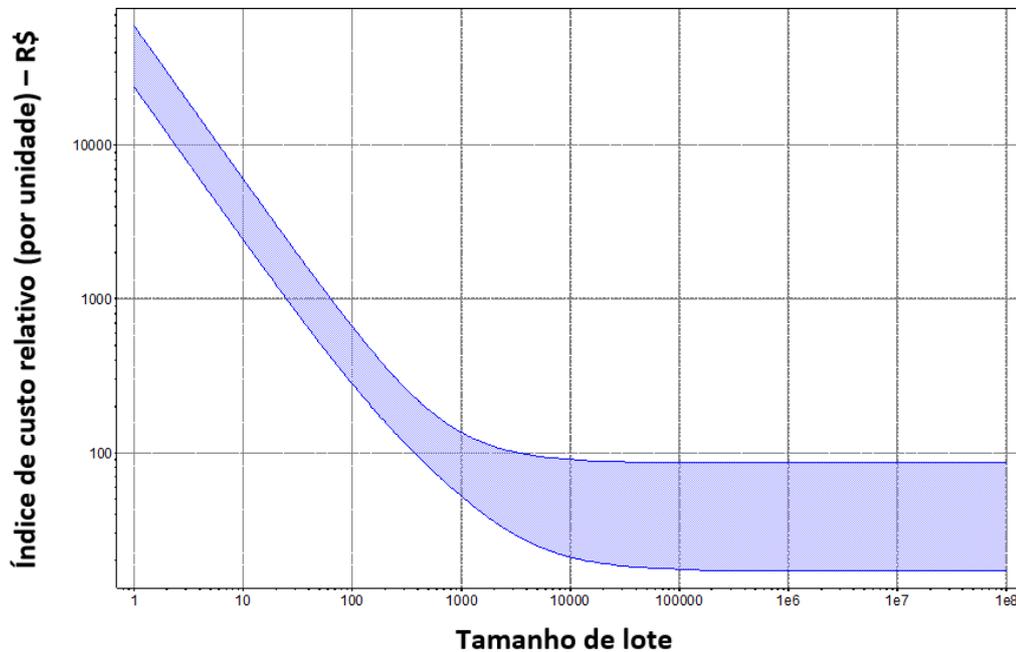
Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 38 – Índice de custo relativo pelo tamanho do lote para o processo de forjamento a frio em matriz fechada



Fonte: Autoria própria (2018)

Figura 39 – Índice de custo relativo pelo tamanho do lote para o processo de forjamento a quente em matriz fechada



Fonte: Autoria própria (2018)

4.6.4 DOCUMENTAÇÃO

Depois de realizar a etapa de documentação para a seleção de processos, não foram encontrados registros de biela em berílio S-200 produzidos por algum destes processos de fabricação citados acima. Porém para a liga de cobre e berílio (Berílio 25), que foi apresentada no quadro dos materiais comumente utilizados para a fabricação de biela, segundo os dados obtidos através do catálogo Materion Brush (2011) são encontrados opções de fabricação para a liga pelo processo de forjamento fechado. O que seria um indicativo de potencialidade para funcionar para a liga de berílio S-200 também.

Após analisar os dados obtidos pelo software é possível perceber que os compósitos e as fibras apesar de apresentarem os melhores desempenhos, para esse projeto apresentam as maiores dificuldades para o processamento. Logo a escolha do melhor material fica para as ligas não ferrosas de berílio por demonstrarem um desempenho superior aos aços e processadas pelo processo Hiping por se tratar do mais viável economicamente.

5 CONCLUSÕES

O projeto ordenou o processo de seleção de materiais e processos de fabricação em uma biela do motor da equipe baseado no estudo e metodologia com múltiplas restrições proposto por Ashby (2005). Sendo assim para a realização desse estudo foi preciso fazer uma revisão de literatura que fosse abordado o método de seleção de materiais e processos proposto por Michael F. Ashby além de conceitos ligados a concepção do projeto para assim aplicar no componente biela do protótipo da equipe pato a jato.

O projeto é intitulado adaptativo onde segundo Ashby (2005) é o projeto que busca aperfeiçoar o desempenho com base na melhoria do principio de funcionamento de um conceito que já existe. Neste estudo em questão o objetivo primordial foi de redução de massa da biela a partir da seleção de um material mais leve que atenda a todos os requisitos de funcionamento do componente.

A metodologia de seleção de materiais com múltiplas restrições estabelecido por Ashby teve como resultado a seleção de compósitos, ligas não ferrosas e fibras e particulados como as melhores alternativas considerando a ótima relação de peso específico e resistência dos candidatos

O processo de seleção foi realizado com a ajuda do software Ces-Edupack 2018 para assim desenvolver os conceitos de mapas de propriedades apresentados por Ashby (2005) a fim de melhorar a visualização dos grupos de materiais e utilizar uma biblioteca avançada de possibilidades, com o objetivo de escolher o material mais leve e que atende as restrições de operação para a biela do motor, para que com isso seja possível melhorar a eficiência energética do veículo.

A seleção foi desenvolvida a partir dos métodos analítico e gráfico apresentados por Ashby e se mostraram métodos eficientes para triar e selecionar o melhor material para as condições de trabalho estabelecidas a partir de um número elevado de possíveis candidatos.

O trabalho atingiu seu objetivo de realizar a seleção de materiais para a biela do protótipo da equipe obtendo como resultado da seleção a liga de berílio S-200 como um bom material para o objetivo de redução de peso baseado no estudo de caso e nas metodologias de seleção e os conceitos de índice de mérito e de mapas de propriedades apresentados por Michael F. Ashby onde foi possível também encontrar um processo de fabricação mais econômico e compatível com o material escolhido na etapa de seleção. mais leve para a fabricação do componente com um processo mais viável economicamente, tudo isso com o auxílio do software Cses-Edupack 2018 que foi explorado amplamente na maioria das suas funções e se mostrou uma excelente ferramenta de seleção de materiais e de processos de fabricação.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, Puneet; Gupta, Ankit. **A Comparative Study of Different Materials of Connecting Rod: A Review**. 2015. 4p

AHMED, G.M Sayeed; Khany, Sirajuddin; Shareef, Syed. **Design, Fabrication and Analysis of a Connecting Rod with Aluminum Alloy and Carbon Fiber**. 2014.14p

ASHBY, Michael F. **Materials Selection in Mechanical Design**. 4.ed. 2005. 665p.

BARROS, J.E.M. **Estudo de Motores de Combustão Interna Aplicando Análise Orientada a Objetos**. 2003

BOROVSKAYA, S.M. **Using CFRP for the design of a connecting rod for automobile applications**. 1994. 4p

CALLISTER, William D. Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2002. 589p

Catálogo MaterionBrush. **Forging and Extruding Cooper Beryllium Alloy**. 2011. 4p

COLOMBO, Maycon. **Projeto de um Bloco de Motor Ciclo Atkinson Visando Alta Eficiência Energética**. 2017.

ETCHEPARE, Hélio; KINDLEIN JR., Wilson. **Implementação de uma Materioteca no Estado do Rio Grande do Sul**. Em: Revista Tecnológica e Tendências. Novo Hamburgo: editora Feevale, Ano 1 V.1 p.65-71, 2002.

FERRANTE, Maurizio. **Seleção de Materiais**. 2. ed. São Carlos: Editora da Universidade Federal de São Carlos, 2002. 286p.

FERRANTE, Maurizio. **Seleção dos Materiais de Construção Mecânica: Estratégias e Metodologia Básica**, 2000. Disponível em: <http://www.spectru.com.br/sel_mat_con_mec.html>. Acesso em 10 nov. 2017

FUKUHAMA, Shoichi; OYA, Yoshitane; SASAKI, Hikari. **Temperature Measurements of the Connecting Rod, Piston Pin and Crankpin Bearing of Automobile Gasoline Engine**.1966.9p

GANDAREZ, Álvaro Jose. **Projeto do Pistão de um Motor de Combustão Interna para um Veículo de Elevada Eficiência Energética**. Coimbra: FCT.2015.92p

IEA (2012b).*Technology Roadmap: Fuel Economy of Road Vehicles*. International Energy Agency, Paris, France. 50p. Disponível em: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Fuel_Economy_2012_WEB.pdf

JOHANSSON, Anders; Thulin,Andreas. **Design of a fuel eficiente internalcombustionengine**.2010.37p

LIMA E SILVA, Rafael Augusto de. **Projeto Mecânico de Biela Automotiva Baseado em Otimização Estrutural**. 2013.189p

MALLICK, P.K. **Materials, design and manufacturing for lightweight vehicles**..2010.376p

PATTON, Willian J. **Materials in Industry**. EUA: Prentice-Hall Inc., 1968.460p.

RODRIGUES, José Pedro. **Projecto de um Motor de Combustão Interna para um Veículo Automóvel de Extra-Baixo Consumo de Combustível**. 2011.109p

TOLEDO, Daniel Gaspari. **Projeto de Biela Para Motor A Combustão Interna Utilizando o Método da Otimização Topológica**. 2009. 9p

VISSER, Danielle. A Comparison of Manufacturing Technologies in the Connecting Rod Industry. 2008. 20p