



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Utilização da Metodologia Ashby de Seleção de Materiais em Componentes Automotivos

Matheus Nantes Costa

Brasília, 12 de novembro de 2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Utilização da Metodologia Ashby de Seleção de Materiais em Componentes Automotivos

Matheus Nantes Costa

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Jorge Luiz de Almeida Ferreira, UnB/ ENM

Prof. Antônio Manoel Dias Henriques, UnB/ ENM

Brasília, 12 de novembro de 2021

RESUMO

O objetivo do presente trabalho é apresentar, por meio de estudos de caso, um processo sistemático de seleção de materiais, tendo como ênfase componentes automotivos. O desenvolvimento do projeto é norteado pela metodologia Ashby de seleção de materiais. A partir da tradução de requisitos de projetos para os componentes considerados, são estabelecidas as restrições que devem ser respeitadas e os objetivos que devem ser atingidos em termos de desempenho do componente. Por meio de Mapas de Propriedades Materiais foi realizado a triagem utilizando-se as restrições, e a classificação utilizando os objetivos estabelecidos. A seleção final foi feita com base em dados e informações específicas relacionadas à logística, disponibilidade e indicadores de sustentabilidade ambiental de cada material candidato classificado.

Todas etapas da metodologia foram empregadas com auxílio do software Granta EduPack. O trabalho logrou êxito ao selecionar materiais viáveis para cada uma das peças selecionadas. Ao final, o trabalho apresenta uma discussão sobre os materiais classificados.

ABSTRACT

The aim of this project is present, by case studies, a systematic process of material selection, having emphasis in automotive components. The development of the project is guided by Ashby's methodology selection of materials. Starting from the interpretation of project's requirements for the considered parts, will be established the restrictions that must be followed and the goals that should be achieved in terms of parts performance. Using properties of materials maps it's possible to do the sorting based in the restrictions, and also make the classification using the goals previously established. The final selection will be done based on specific information related to logistics, availability and environmental sustainability index of each classified material.

All methodology phases where used with the help of Granta Edupack software. The project meet success in select viable material for each one of the selected parts. At the end, the project presents a discussion about the classified materials.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	2
1.3 METODOLOGIA	2
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 PROCESSO DE PROJETO	3
2.1.1 TIPOS DE PROJETO	6
2.2 FERRAMENTAS DE PROJETO E DADOS DE MATERIAIS	6
2.3 FUNÇÃO, MATERIAL, FORMA E PROCESSO	7
2.3.1 FAMÍLIAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA	8
2.4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS	8
2.5 DIAGRAMAS DE PROPRIEDADES DE MATERIAIS	9
2.6 ESTRATÉGIA DE SELEÇÃO DE MATERIAIS	10
2.6.1 TRADUÇÃO	10
2.6.2 TRIAGEM	11
2.6.3 CLASSIFICAÇÃO	11
2.6.3 DOCUMENTAÇÃO	11
2.7 ÍNDICES DE MATERIAIS	11
2.7.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS COM MÚLTIPLAS RESTRIÇÕES	13
2.7.2 FERRAMENTAS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS	14
3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES AUTOMOTIVOS	16
3.1 BIELA	16
3.2 MOLA DE SUSPENSÃO	16
3.3 VOLANTE DE MOTOR	17
3.4 PINÇA DE FREIO	17
3.5 CAPÔ	18
4 REQUISITOS DE PROJETO	19
4.1 TRADUÇÃO	19
4.2 ÍNDICES DE MATERIAIS	20
4.2.1 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA BIELA	20
4.2.2 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA MOLA	23
4.2.3 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA VOLANTE DE MOTOR	23
4.2.4 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA PINÇA DE FREIO	25
4.2.5 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA O CAPÔ DE UM AUTOMÓVEL	27
5 TRIAGEM	28
5.1 BIELA	28
5.1.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA BIELA	28
5.1.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA BIELA NO GRANTA-EDUPACK	31
5.2 MOLA	32
5.2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA MOLA	32
5.2.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA MOLA NO GRANTA-EDUPACK	33
5.3 VOLANTE DO MOTOR	34
5.3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA O VOLANTE DO MOTOR	34
5.3.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA O VOLANTE NO GRANTA-EDUPACK	35
5.4 PINÇA DE FREIO	36
5.4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA A PINÇA DE FREIO	36
5.4.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA A PINÇA DE FREIO NO GRANTA-EDUPACK	37
5.5 CAPÔ AUTOMOTIVO	38
5.5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA CAPÔ AUTOMOTIVO	38
5.5.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA CAPÔ AUTOMOTIVO NO GRANTA-EDUPACK	38
6 CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO PARCIAL	40
6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A BIELA	40
6.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A MOLA	41
6.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA O VOLANTE DE MOTOR	42
6.4 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A PINÇA DE FREIO	43
6.5 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA O CAPÔ	45
7 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO FINAL	47
7.1 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA A BIELA	47
7.2 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA A MOLA	48
7.3 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA O VOLANTE DE MOTOR	49
7.3 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA A PINÇA DE FREIO	50
7.3 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA O CAPÔ AUTOMOTIVO	53
8 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56

8.1 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA A BIELA	56
8.2 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA A MOLA DE SUSPENSÃO	56
8.3 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA O VOLANTE DE MOTOR	57
8.4 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA A PINÇA DE FREIO.	57
8.3 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA O CAPÔ AUTOMOTIVO.....	57
9 CONCLUSÃO	58
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
11 ANEXOS	61
10.1 ANEXO A.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de projeto.....	3
Figura 2. Sistema técnico como uma subdivisão em unidades e componentes	4
Figura 3. Sistema técnico com divisão em subsistemas com entradas e saídas de insumos	5
Figura 4. Caminho de Projeto com processos iterativos (Ashby, 2012)	6
Figura 5. Fluxograma com ferramentas de projeto	7
Figura 6. Interação entre Função, Material, Forma e Processo	8
Figura 7. Família de Materiais.....	8
Figura 8. Diagrama E- ρ (Ashby, 2012)	9
Figura 9 - Estratégia para seleção de materiais	10
Figura 10 - Função, restrições e variáveis livres (Ashby, 2012)	10
Figura 11 - Painel submetido a esforço de flexão (Ashby, 2012)	11
Figura 12 - Exemplos de índice de material (Ashby, 2012).....	13
Figura 13 - Seleção com objetivos conflitantes (ASHBY, 2011)	14
Figura 14 - Exemplo de biela automotiva, (http://www.barros.com.br/noticia/qual-a-funcao-da-biela-no-motor)	16
Figura 15 - Exemplo de mola de suspensão, (https://jmautopecasloja.com.br/produto/mola-suspensao-dianteira-esquerda-fabrini-fo0162m/).....	17
Figura 16 - Exemplo de Volante de Motor (https://www.giganteautopeca.com.br/volante-do-motor-modelo-8-furos-375mm-125dentes-3520303905-mercedes-of-13151318-om-366)	17
Figura 17 - Exemplo de Pinça de Freio (http://www.udikart.com.br/loja/produtos-novos/pinca-de-freio-flutuante-mega-2020/)	18
Figura 18 - Exemplo de capô (https://www.jocar.com.br/produto/dodge/dakota/50408-capo-dianteiro-importado-dakota-1995-ate-2001-para-pintar-30846/).....	18
Figura 19 - Esboço de biela automotiva	21
Figura 20 - Esquema do volante de motor	24
Figura 21 - Esquema de freio a disco	25
Figura 22- Viga sob carregamento de flexão	25
Figura 23 - Sistema pistão-biela-virabrequim (RODRIGUES, 2011)	28
Figura 24 - Motor M3165 depois de montado (RODRIGUES, 2011).....	28
Figura 25 - Geometria da árvore de potência (BASSHUYSEN & SCHÄFER, 2004).....	29
Figura 26 - Diagrama de materiais para a biela após a triagem	31
Figura 27 - Molas Helicoidais de compressão utilizadas para aplicação em suspensão automotiva de um Fiat Uno, fabricadas pela a empresa RNA Fabrini. (RUTHES, 2016)...	32

Figura 28 - Diagrama de materiais para a mola após a triagem	34
Figura 29 - Curva de Torque e Potência para motor EA888 (WELLER 2018)	34
Figura 30 - Volante de motor aliviado (https://www.allpartsnet.com.br/volante-motor-aliviado-exedy-honda-civic-si-2-0-2006-2011-vmho0002/p)	35
Figura 31 - Diagrama de materiais para volante após a triagem.	36
Figura 32 - Análise da tensão exercida pela pastilha de freio sobre o corpo da pinça (TROCADO, 2017)	36
Figura 33 - Diagrama de materiais para pinça de freio após a triagem	37
Figura 34 - Carenagem lateral colhedora John Deere (SCHELESKI, 2015)	38
Figura 35 - Diagrama de materiais para carenagem lateral de colhedora após a triagem	39
Figura 36 - Diagrama de classificação da biela (falha por fadiga)	40
Figura 37 - Diagrama de classificação da biela (falha por flambagem)	41
Figura 38 - Diagrama de classificação para mola	42
Figura 39 - Diagrama de classificação para volante de motor	43
Figura 40 -Diagrama de classificação para pinça de freio (minimizar massa)	44
Figura 41 Diagrama de classificação para pinça de freio (maximizar transferência de calor)	44
Figura 42 - Diagrama de classificação para capô automotivo (maximizar ductilidade)....	45
Figura 43 - Diagrama de classificação para capô automotivo (minimizar massa).....	46
Figura 44 - Biela de Titânio (catálogo SPA)	47
Figura 45 - Diagrama de Quantidade CO2 por quantidade de material (kg/kg) para os materiais finalistas da mola.	49
Figura 46 - Diagrama de Quantidade CO2 por quantidade de material (kg/kg) para os materiais finalistas do volante de motor.	50
Figura 47 - Diagrama dos preços dos materiais finalistas para pinça de freio (minimizar massa).....	51
Figura 48 -Diagrama dos preços dos materiais finalistas para pinça de freio (maximizar transferência de calor).	52
Figura 49 - Diagrama de Quantidade CO2 por quantidade de material (kg/kg) para os materiais finalistas da pinça de freio.	53
Figura 50 - Diagrama dos preços dos materiais finalistas para capô automotivo (maximizar ductilidade).....	54
Figura 51 - Diagrama dos preços dos materiais finalistas para capô automotivo (minimizar massa).....	54
Figura 52 - pegada de carbono por massa reciclada dos materiais finalistas para o capô automotivo	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos definidos para a biela	19
Tabela 2 - Requisitos definidos para a mola de suspensão	19
Tabela 3 - Requisitos definidos para o volante de motor	19
Tabela 4 - Requisitos definidos para a pinça de freio	20
Tabela 5 - Requisitos definidos para o capô	20
Tabela 6 - Valores máximos de densidade de fluxo de calor, Q_{emb} , e de pressão máxima na câmara de combustão, p_{max} , para cada velocidade de rotação do motor durante o ciclo de funcionamento (RODRIGUES, 2011)	30
Tabela 7 - Variáveis da suspensão dianteira de um Fiat Uno (RUTHES, 2016)	32
Tabela 8 - Dados das molas dianteiras (RUTHES, 2016)	32
Tabela 9 - Resultado da análise de tensão (TROCADO, 2017)	37
Tabela 10 - Materiais Selecionados para biela (falha por fadiga)	40
Tabela 11 - Materiais Selecionados para biela (falha por flambagem)	41
Tabela 12 - Materiais selecionados para mola.....	41
Tabela 13 - Materiais selecionados para mola.....	42
Tabela 14 - Materiais Selecionados para pinça de freio (minimizar massa)	43
Tabela 15 - Materiais Selecionados para pinça de freio (maximizar transferência de calor)	44
Tabela 16 - Materiais Selecionados para capô automotivo (maximizar ductilidade).....	45
Tabela 17 - Materiais Selecionados para capô automotivo (minimizar massa).....	45
Tabela 18 - Preço dos materiais finalistas para biela	48
Tabela 19 - Quantidade de CO2 por quantidade de material para os materiais finalistas para a mola.	48
Tabela 20 - Quantidade de CO2 por quantidade de material para os materiais finalistas para o volante de motor.	49
Tabela 21 - Preço dos materiais finalistas para pinça de freio (minimizar massa).	50
Tabela 22 - Preço dos materiais finalistas para pinça de freio (maximizar transferência de calor).....	51
Tabela 23 - Quantidade de CO2 por quantidade de material para os materiais finalistas para a pinça de freio.	52
Tabela 24 - Preço dos materiais finalistas para capô automotivo (maximizar ductilidade)	53
Tabela 25 - Preço dos materiais finalistas para capô automotivo (minimizar massa)	54
Tabela 26 - Índice de pegada de carbono por massa reciclada dos materiais finalistas para o capô automotivo.....	55
Tabela 27 - Resultados da seleção de materiais para os componentes automotivos.....	56

Tabela 28 - Principais características do motor e outros componentes (RODRIGUES, 2011)61

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
b	Largura	[m]
E	Módulo de Elasticidade	[GPa]
E_p	Energia Potencial	[J]
E_{cr}	Energia Cinética de Rotação	[J]
E_{pV}	Densidade Energética	[J/m ³]
F	Força	[N]
h	Espessura	[m]
I	Momento de Inércia	[m ⁴]
J	Momento Polar de Inércia	[m ⁴]
k_a	Fator de Acabamento Superficial	
k_b	Fator de Tratamento	
k_c	Fator de Carregamento	
k_d	Fator de Temperatura	
k_e	Fator de Entalhe	
k_f	Fator de Redução de Resistência à Fadiga	
k	Condutividade térmica	[W/m ² °C]
K	Rigidez de mola	[N/m]
L	Comprimento	[m]
m	Massa	[kg]
M_i	Índice de Material	
R	Raio	[m]
S	Rigidez	[N/m]
T	Temperatura	[°C]
U	Coeficiente global de transferência de calor	[W/m ² .K]

Símbolos Gregos

α	Constante de forma	
β	Constante de Proporcionalidade	
δ	Deflexão	[m]
Δ	Variação entre duas grandezas similares	
ϵ	Ductilidade	
ρ	Densidade	[m ³ /kg]
σ_A	Tensão alternada	[N/m ²]
σ_{max}	Tensão máxima	
σ_{min}	Tensão mínima	
σ_e	Resistência a fadiga	[N/m ²]
σ_y	Resistência ao Escoamento	[N/m ²]
ν	Coeficiente de Poisson	
ϑ	Velocidade do som em um sólido	[m/s]
ω	Velocidade angular	[rad/s]

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

No processo de desenvolvimento de produto, a seleção de materiais é uma das decisões mais importantes que deve ser tomada. Normalmente, no desenvolvimento de um produto, essa decisão precede o dimensionamento de peças (Ferrante, 2013). Tão importante quanto as propriedades mecânicas no projeto contra falhas mecânicas, há outros fatores que devem ser levados em consideração. Muitos componentes têm funções diferentes daquelas de resistir a um carregamento mecânico (Ashby M. , 2012). Vários componentes podem ser projetados para desempenhar outras funções diferentes de resistir carga e a até mesmo funções estéticas. Cross deixa explícito que o design de um produto está diretamente vinculado com a função que este irá executar, e para atingir tal função é necessário se fazer uma escolha eficiente de materiais (Cross, 2000) . Portanto, vários fatores podem influenciar a seleção de um material no projeto mecânico, e o projetista deve ter essa consciência e estar devidamente capacitado para tratar devidamente todos esses fatores (Budynas, 2016).

Além de não depender somente dos requisitos mecânicos, a seleção de materiais no projeto mecânico tem se tornado cada vez mais complexa devido à crescente quantidade de materiais à disposição do engenheiro. Estima-se que existem atualmente mais de 160 mil tipos de materiais à disposição dos engenheiros (Ashby M. , 2012). No passado, não era incomum encontrar nas indústrias engenheiros, já com vasta experiência profissional, que exerciam uma verdadeira função de “guru dos materiais”, onde sua fonte primordial de conhecimento era o empirismo, ou seja, da própria experiência de projetos já realizados anteriormente (Ashby M. , 2012). Apesar de funcional, há sérios problemas nessa arcaica metodologia. Primeiramente, por que isso faz com que a empresa se torne refém de um profissional, e, caso o conhecimento que ele detenha não seja repassado para outros engenheiros, isso poderá, eventualmente, comprometer os projetos a serem desenvolvidos pela empresa. Além disso, e talvez o mais importante, essa falta de cultura do emprego de uma metodologia de seleção de materiais limita o desenvolvimento de novos produtos.

Portanto, neste contexto, o domínio de uma metodologia de seleção materiais no projeto mecânico mostra-se importante e necessária. Existem diversas metodologias de seleção de materiais (Pahl & Beitz, 1997; Dieter, 1999), mas no contexto deste projeto utilizar-se-á a metodologia proposta por Michael Ashby (Ashby M. , 1992; Ashby M. , 2012) que será empregada para a seleção de materiais no setor automotivo.

1.2 OBJETIVO

O objetivo do presente projeto é selecionar, pela Metodologia Ashby de Seleção de Materiais, materiais que possam vir a substituir os tradicionalmente utilizados em alguns componentes automotivos. Especificamente, os componentes considerados foram: biela, mola de suspensão, volante de motor, pinça de freio e capô automotivo.

1.3 METODOLOGIA

Na tentativa de lograr êxito com a realização deste trabalho foram definidas as seguintes diretrizes metodológicas. Primeiramente, os componentes a serem analisados foram mapeados tomando-se como referência os componentes mecânicos comuns a diversos modelos de automóveis. Após o mapeamento dos componentes pilotos, foi feito um levantamento dos requisitos de projeto para cada componente selecionado. O próximo passo foi aplicar a metodologia de seleção de materiais de Ashby para, a partir do universo de materiais à disposição do engenheiro, chegar-se a um grupo de poucos candidatos que atendam aos requisitos de projeto. A seleção final é então feita com base em dados e informações locais e específicas em termos de disponibilidade, logística e histórico do material em projetos anteriores.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a metodologia de seleção de materiais proposta por Ashby, abordando desde temas introdutórios de classificação de projeto, até a parte índice de materiais. No capítulo 3 são apresentados os componentes automotivos selecionados para servirem de objeto para o presente estudo de caso. No capítulo 4 é realizada a etapa de definição dos requisitos de projeto de cada um dos componentes previamente selecionados e também são estipulados os índices de materiais de cada um dos componentes. Nos capítulos 5 a 7 são empregadas todas as etapas da metodologia de seleção de materiais a cada um dos componentes. Por fim, no capítulo 8, são apresentadas as conclusões obtidas por meio deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PROCESSO DE PROJETO

Uma das formas de definir Projeto de Engenharia é entendê-lo como o processo de aplicação de várias técnicas e princípios científicos com o intuito de definir um dispositivo, um método ou um sistema suficientemente pormenorizado para permitir sua realização (Norton, 2013). Independente da finalidade do produto a ser fabricado, sempre haverá a necessidade de que os materiais dos quais o produto será feito e seus respectivos processos de fabricação passem pelo crivo do projetista. A escolha de um material não pode ser realizada sem que os processos de fabricação sejam considerados (Callister, 2002).

O melhor ponto de partida no desenvolvimento de produto é o bom projeto mecânico e saber como a seleção de materiais e processos irá contribuir para sua real execução. Assim sendo, a escolha de materiais e processo de fabricação podem ser definidos como ponto central de um projeto (Etchepare & Kindlein Jr., 2002).

Uma das formas de se descrever as funcionalidades de um produto é através da descrição dos requisitos que esse irá atender (Ferrante, 2013). Ashby propõe que os requisitos de um projeto devem ser estabelecidos de forma concisa e objetiva desde a declaração de sua necessidade até as especificações do produto. Conforme ilustrado na figura 1.

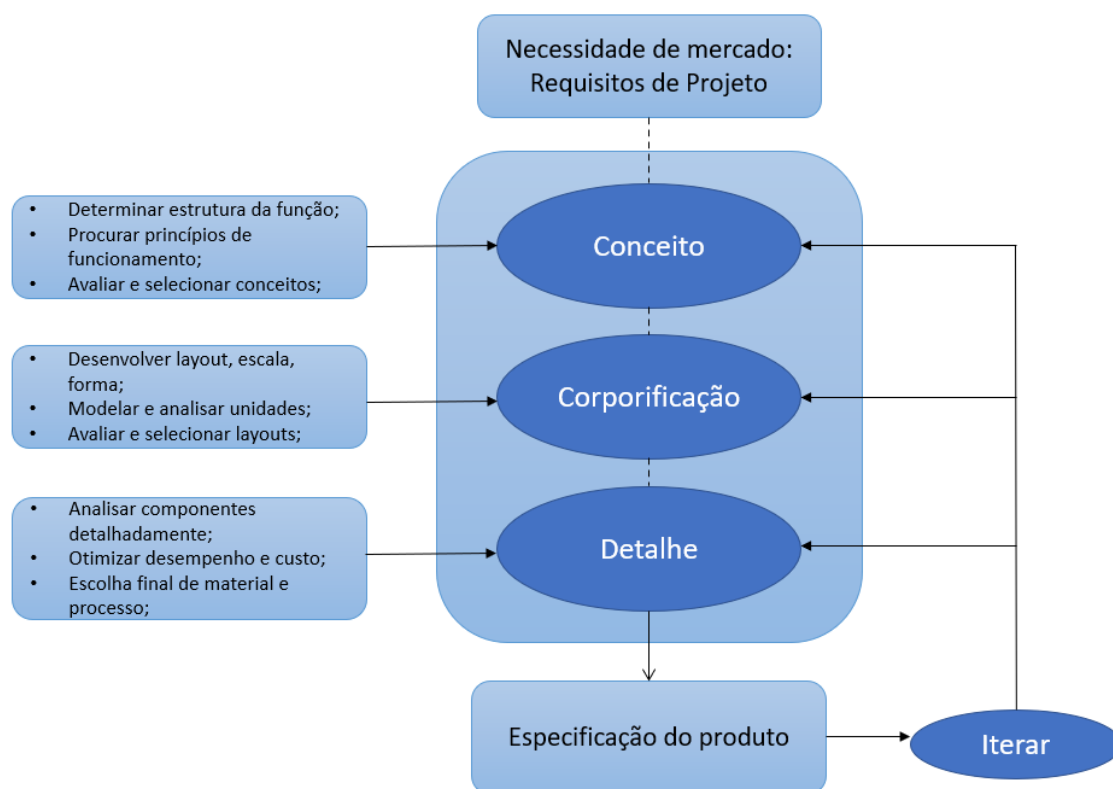


Figura 1. Fluxograma de projeto

O produto também pode ser entendido como um sistema técnico, que se divide em subunidades e componentes. Cada um destes possui uma atribuição, e quando reunidos executam a tarefa exigida para qual o dado produto foi projetado. Como ilustra a figura 2.

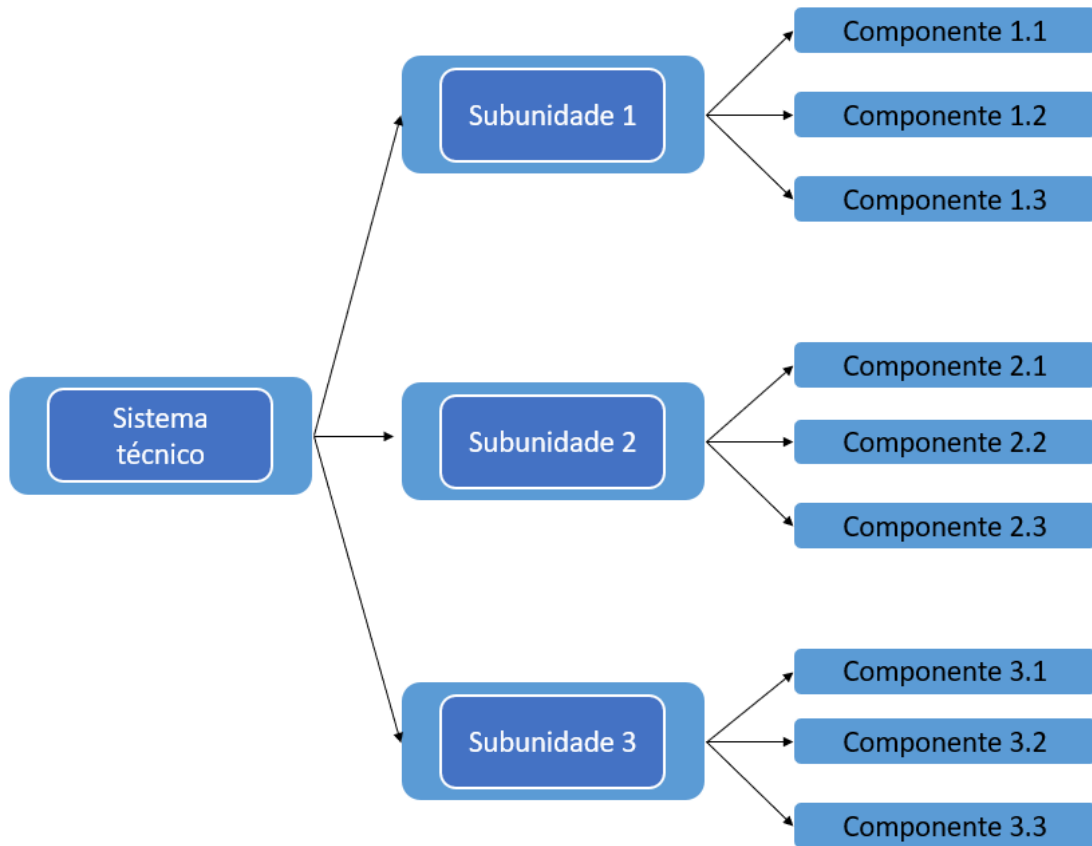


Figura 2. Sistema técnico como uma subdivisão em unidades e componentes

Contudo, o fluxograma da figura 2 só é útil para compreender produtos já existentes ou auxiliar em processos de engenharia reversa. Para o desenvolvimento de um novo projeto, é mais útil se realizar uma subdivisão baseada nas ideias da análise de sistemas, que considera os insumos, fluxos e saídas de informações, energia e materiais. Conforme a Figura 3.

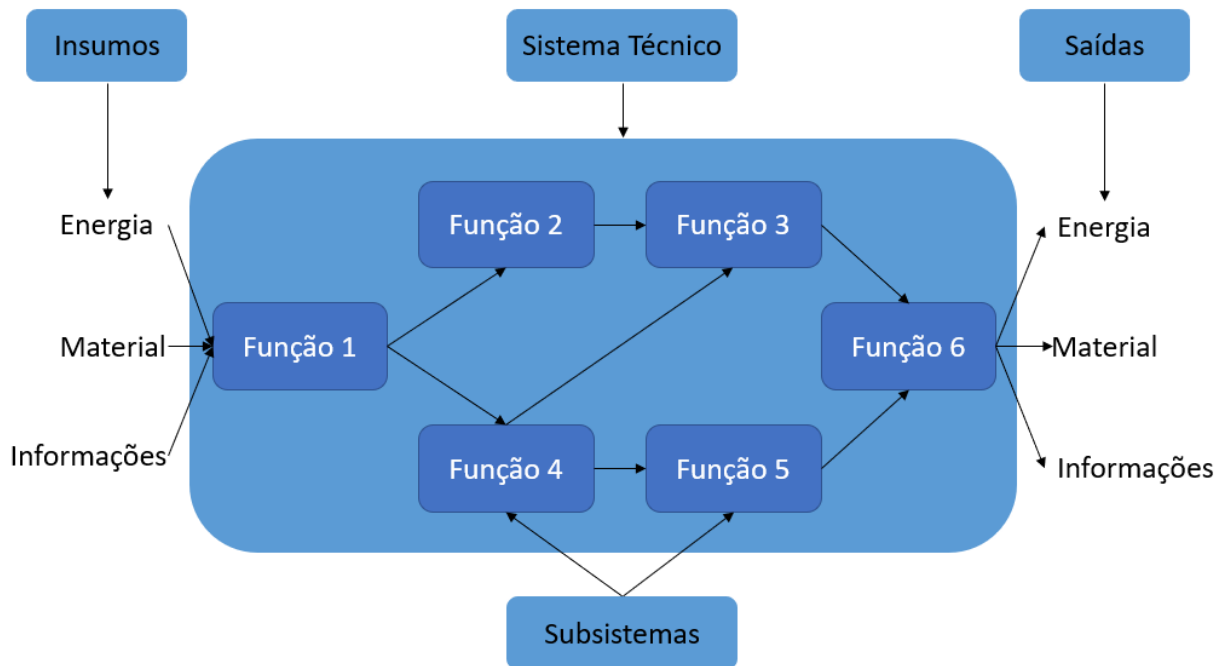


Figura 3. Sistema técnico com divisão em subsistemas com entradas e saídas de insumos

Seguindo, dá-se início a fase de conceitos que serão responsáveis por desempenhar uma determinada função (subsistema). Já na fase de corporificação, o projetista dimensiona peças e seleciona materiais com base no que foi levantado na fase de conceitos, garantindo que os componentes irão operar em uma determinada faixa de tensão, temperatura e em um dado ambiente (requisitos de projeto). Por fim, é realizada a fase de detalhe, onde irá ocorrer análise de componentes que irão operar sob regime crítico, processo de otimização topológica, definição de tolerâncias, custeio de fabricação e etc. Porém, conforme ilustrado na Figura 1, tem-se a impressão que esse é um processo linear, o que muitas das vezes não é verdade. Projetos são basicamente realizados por processos iterativos e laços de repetição, onde não é incomum ter que se rever determinadas tomadas de decisão. No fim das contas, um projeto acaba assumindo uma forma mais semelhante ao fluxograma da Figura 4.

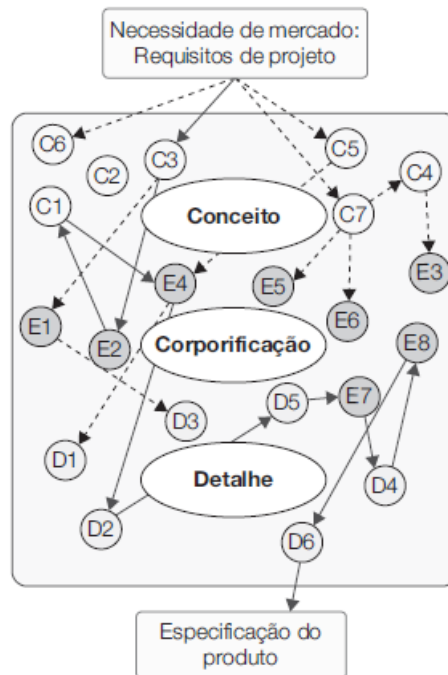


Figura 4. Caminho de Projeto com processos iterativos (Ashby, 2012)

2.1.1 TIPOS DE PROJETO

Para Ashby, existem três tipos de projeto. O projeto original, que necessariamente envolve o desenvolvimento de uma nova ideia ou princípio de funcionamento. O projeto adaptativo, que toma um produto ou grupo de produtos e procura um avanço incremental no desempenho mediante um refinamento do princípio de funcionamento, ou simplesmente ambiciona reduzir custos ou adaptá-lo as condições de mercado. E por último, o projeto variante, que consiste numa mudança de escala, dimensão ou detalhamento ou do método para consegui-la.

2.2 FERRAMENTAS DE PROJETO E DADOS DE MATERIAIS

À medida que o projeto evolua, ocorre uma progressão natural na utilização de ferramentas. Dentre as principais ferramentas vale destacar os softwares modeladores de sólidos em três dimensões que permitem visualização e criam arquivos que podem ser usados baixados para sistemas de prototipagem e fabricação controlados numericamente, por isso são bastante utilizados nas fases de conceito e corporificação do projeto. Ferramentas de projeto podem ser utilizadas em qualquer fase do mesmo, como representado da Figura 5.

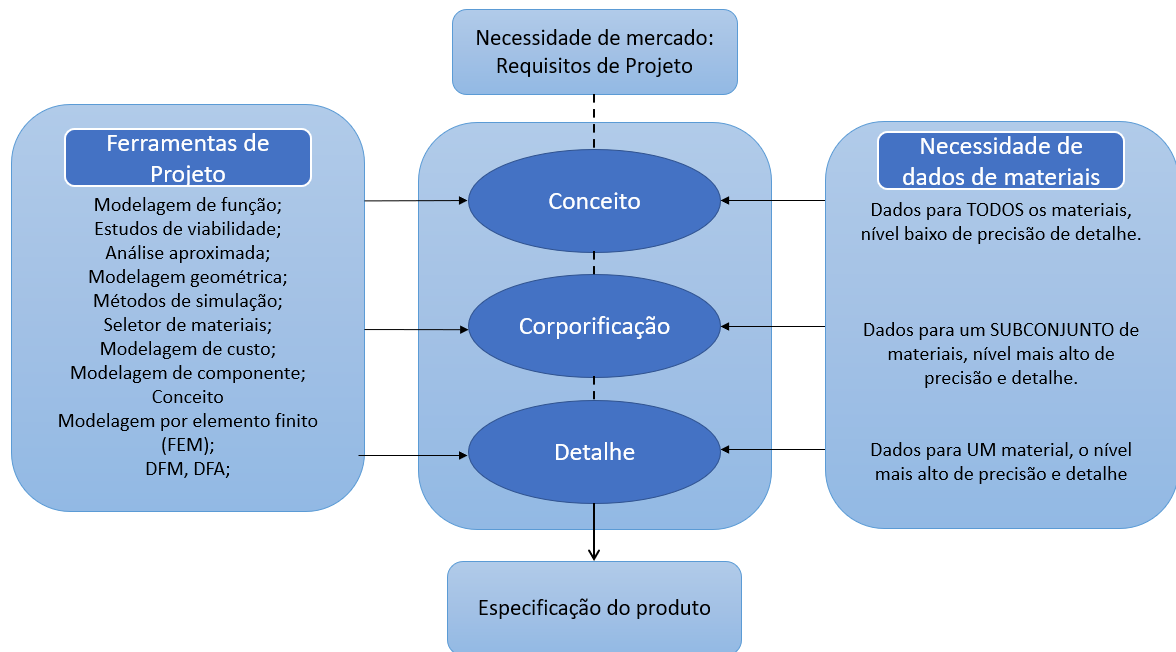


Figura 5. Fluxograma com ferramentas de projeto

Com o avanço da tecnologia e conseqüentemente das técnicas de elaboração de projetos, novos tipos de ferramentas vêm sendo utilizados, como os softwares para seleção de materiais.

As ferramentas para seleção de materiais desempenham um papel importante em cada estágio do projeto. A Natureza dos dados necessários nos primeiros estágios é muito diferente em nível de precisão dos necessários em etapas mais avançadas. No estágio de conceito, o projetista faz uso de valores aproximados das propriedades, porém para a faixa de materiais mais ampla possível. No estágio de corporificação, são necessários dados para um subconjunto mais estreito de materiais, porém em um nível mais alto de precisão e detalhe, esses dados são encontrados em manuais e softwares mais especializados que tratam de uma única classes ou subclasse de materiais. No estágio de detalhe, são exigidas informações do material em um nível ainda mais alto de precisão, porém para apenas um ou alguns poucos materiais, normalmente encontradas em planilhas de dados publicadas pelos próprios fabricantes (Ashby M. , 2012).

2.3 FUNÇÃO, MATERIAL, FORMA E PROCESSO

O processo de seleção de materiais está fortemente vinculado ao processo de fabricação, forma (geometria) e função que o componente irá exercer. Essas interações são de duas vias: a especificação da forma restringe a escolha de material e processo, porém, igualmente, a especificação do processo limita a escolha do material e as formas acessíveis. Quanto mais sofisticado o projeto, mais rigorosas as especificações e maiores as interações (Ashby M. , 2012). A figura 6 ilustra esse processo iterativo.

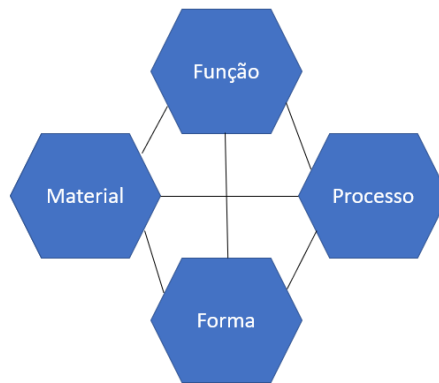


Figura 6. Interação entre Função, Material, Forma e Processo

2.3.1 FAMÍLIAS DE MATERIAIS DE ENGENHARIA

Na ciência dos materiais é bastante comum classificar os materiais em famílias, que são grupos com algumas propriedades em comum como: propriedades semelhantes, rotas de processamento semelhante e, muitas das vezes, aplicações semelhantes. Ashby classifica os materiais de engenharia em seis famílias gerais, conforme a Figura 7.



Figura 7. Família de Materiais

2.4 CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

A seleção de materiais tem como bases diversos critérios quantitativos (custo, tipo de carregamento, resistência ao desgaste...) e qualitativos (design, ergonomia). Se cada critério for analisado individualmente o processo de escolha será simplificado, pois ficará restrito a um pequeno nicho de materiais. Entretanto, na prática, a realidade é outra, é bastante comum ter situações em que haverá um conflito de critérios que são tidos como relevantes para a execução do projeto. Por isso, há a necessidade de se implementar métodos que tentem ponderar esses critérios, promovendo interações que resultem em otimização (Ferrante, 2013).

2.5 DIAGRAMAS DE PROPRIEDADES DE MATERIAIS

Os diagramas de materiais podem ser entendidos como uma forma de apresentar, por meio de uma representação gráfica, as propriedades dos materiais, onde, em cada eixo, é atribuído uma propriedade física de interesse para o projeto. Esses diagramas auxiliam o projetista no processo de escolha do material, pois permitem que sejam realizadas uma triagem de todos os materiais existentes que se adequam as restrições de projeto.

A Figura 8 mostra o diagrama Módulo de Young (E) por Densidade (ρ). Cada família de materiais é englobada por uma curva maior, e se dá o nome de envelope. Dentro de cada envelope estão contidas bolhas brancas que representam classes de materiais. Como cada propriedade apresenta um intervalo de magnitude bastante elevado e distinto, faz-se necessário representar o digrama sobre a forma log-log para uma melhor leitura.

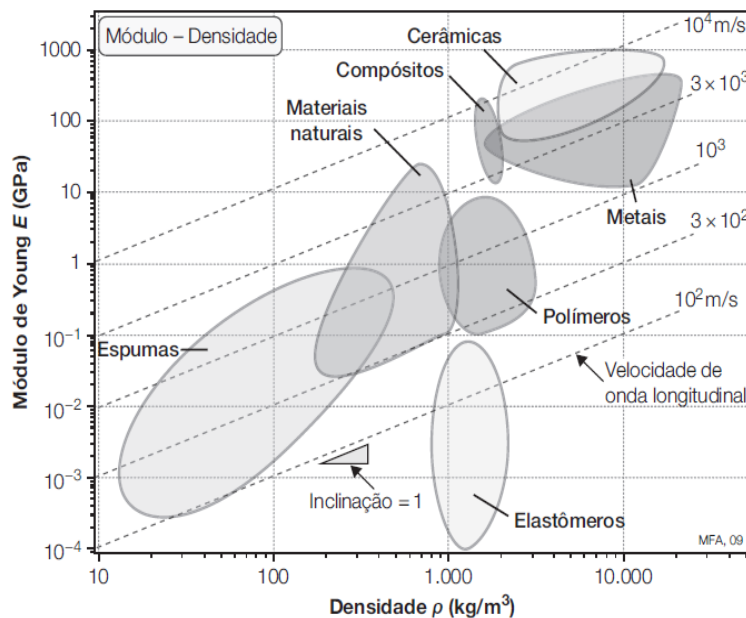


Figura 8. Diagrama E- ρ (Ashby, 2012)

Ainda sobre o diagrama, é possível se obter mais informações de um dado material ao correlacionar as propriedades dos eixos, é o caso das curvas tracejadas paralelas presentes na Figura 8. Essas curvas representam a curva da velocidade do som (ϑ) em um sólido, que é dado pelas Eqs. (1) e (2). Permitindo assim acrescentar contornos de velocidade de onda.

$$\vartheta = \left(\frac{E}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (1)$$

Ou (tomando os logaritmos):

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

2.6 ESTRATÉGIA DE SELEÇÃO DE MATERIAIS

A estratégia proposta por Ashby pode ser sintetizada em cinco etapas, são estas: tradução de requisito de projeto, triagem por meio de restrições, classificação usando objetivos, e a procura por informações de apoio a tomada de decisão. Conforme ilustrado na figura 9.

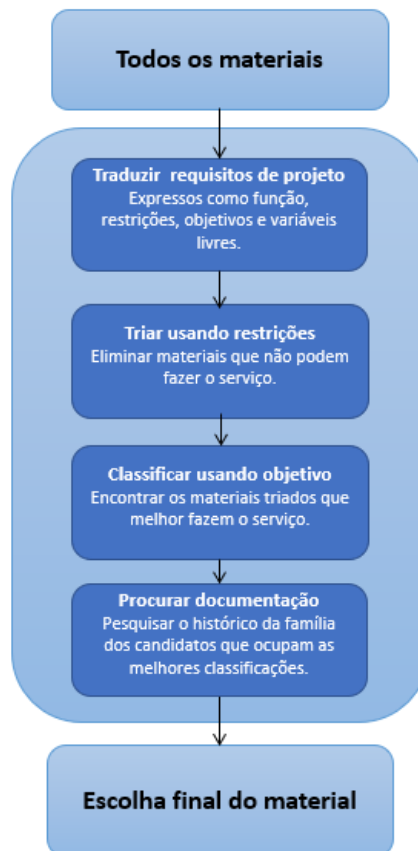


Figura 9 - Estratégia para seleção de materiais

2.6.1 TRADUÇÃO

É nesse momento que projetista irá deixar explícito as funções de cada componente de engenharia (ex: suportar cargas, conter pressão, transmitir calor etc.) por meio de restrições (dimensões geométricas, rigidez). Também é nessa etapa do processo estratégico que são definidos os objetivos (mais barato possível, mais seguro possível, mais leve possível, etc.). A Figura 10 exemplifica o processo de tradução por meio de indagações que o próprio engenheiro deve se fazer.

	Função, restrições, objetivos e variáveis livres
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).	

Figura 10 - Função, restrições e variáveis livres (Ashby, 2012)

2.6.2 TRIAGEM

Essa é etapa onde são eliminados os materiais que não são capazes fazer determinado serviço, porque um ou mais atributos está fora dos limites estabelecidos pelas restrições.

2.8.3 CLASSIFICAÇÃO

Nesta fase procura-se otimizar o projeto, após a triagem ter sido realizada procura-se definir, dentre os materiais restantes, os que melhor desempenham suas funções. Às vezes o melhor desempenho está vinculado a uma única propriedade do material, porém, não são raros os casos em que é necessário se promover uma combinação de propriedades para se otimizar uma função.

2.6.3 DOCUMENTAÇÃO

Essa é a parte final do processo estratégico proposto por Ashby, onde após a lista de materiais passar por um processo de refino na etapa de classificação, gera-se uma pequena lista com os materiais que irão atender a finalidade do projeto com excelência. Agora é o momento onde o projetista procura estudos de casos de utilizações anteriores do material, análises de falha, informações sobre disponibilidade de preço e etc. A Documentação ajuda a reduzir a lista curta até uma escolha final (Ashby M. , 2012).

2.7 ÍNDICES DE MATERIAIS

Até o presente momento toda a estratégia de seleção de materiais foi explicada de forma meramente qualitativa, porém, para a real execução de projeto se faz necessário estabelecer uma espécie de ponderação quantitativa entre as propriedades de um material que serão mais importantes para uma dada aplicação, e é justamente por meio dessa ideia que se define o Índice de Material.

A propriedade ou grupo de propriedades que maximiza desempenho para um dado projeto é denominada seu Índice de Material. Há muitos desses índices, cada um associado à maximização de algum aspecto ou desempenho. Eles dão critérios de excelência que permitem classificar materiais por sua capacidade de ter bom desempenho na aplicação dada (Ashby M. , 2012).

Por exemplo, num projeto de um painel onde se ambicione que este componente seja rígido, com a menor massa possível. O comprimento (L) e a largura (b) são especificados, mas a espessura (h) é livre e está submetido a uma flexão devido um carregamento central (F), conforme a Figura 11. Por definição de projeto é definido que o painel não pode sofrer uma deflexão maior que δ .

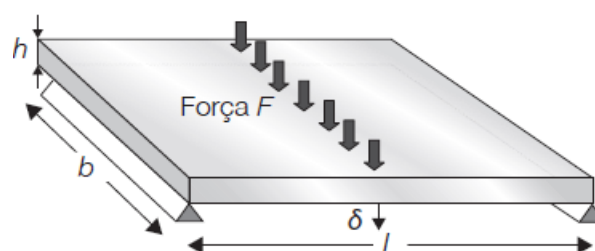


Figura 11 - Painel submetido a esforço de flexão (Ashby, 2012)

O primeiro passo é procurar definir uma equação que descreva a quantidade a ser minimizada ou maximizada (a depender do caso), na presente situação é a massa (m), essa equação é definida como função objetivo:

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

Onde ρ é a massa específica.

A rigidez à flexão S do painel deve ser maior ou igual a S^* :

$$S = \frac{C_1 EI}{L^3} > S^* \quad (4)$$

Onde C_1 é uma constante que depende somente da distribuição de cargas, E é o módulo de elasticidade do material e I é o momento de inércia de área, sendo definido para uma seção retangular como:

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

É possível reduzir o valor da massa reduzindo-se o valor de h , porém somente até um valor que satisfaça a rigidez. Combinando as equações (3), (4) e (5) obtém-se:

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

\longleftarrow Restrição funcional
 \longleftarrow Restrições geométricas
 \longleftarrow Propriedades de material

Onde conclui-se que somente os itens que constam no último parênteses da equação são propriedades do material, e serão estas que definirão o índice de material. Para fins de convenção, define-se que no numerador deve ficar a propriedade que queremos maximizar, dessa forma inverte-se a fração, resultando no seguinte índice de material:

$$M_{p1} = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (7)$$

Por meio desse índice de material é possível, com o auxílio de um diagrama de materiais, realizar a triagem de materiais e futuramente efetivar a escolha definitiva do material.

Ashby propôs diversos índices de materiais, que são de uso recorrente na engenharia, conforme consta na Figura 12.

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

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

Figura 12 - Exemplos de índice de material (Ashby, 2012)

2.7.1 SELEÇÃO DE MATERIAIS COM MÚLTIPLAS RESTRIÇÕES

Na maior parte dos problemas de seleção de materiais há um excesso de restrições e poucas variáveis livres. Ashby propõe que para resolver esse problema primeiro devem ser identificadas as restrições e objetivo impostos pelos requisitantes de projeto e aplicadas as seguintes etapas:

- Triar, usando cada restrição por vez.
- Classificar, usando a métrica de desempenho que descreve o objetivo (muitas vezes massa, volume ou custo) ou simplesmente pelo valor de índice do material que aparece na equação para a métrica.
- Procurar documentação para os candidatos mais bem classificados e usá-los para fazer a escolha final.

A figura 13 ilustra um processo de seleção de materiais com múltiplas restrições que já foram aprovados numa etapa de triagem (sendo os materiais representados pelas bolhas verdes), e que agora estão sendo classificados pelos critérios massa “*m*” e custo “*c*”, onde as soluções ótimas são os materiais que se encontram na curva entre as curvas tracejadas de cor vermelha e preta.

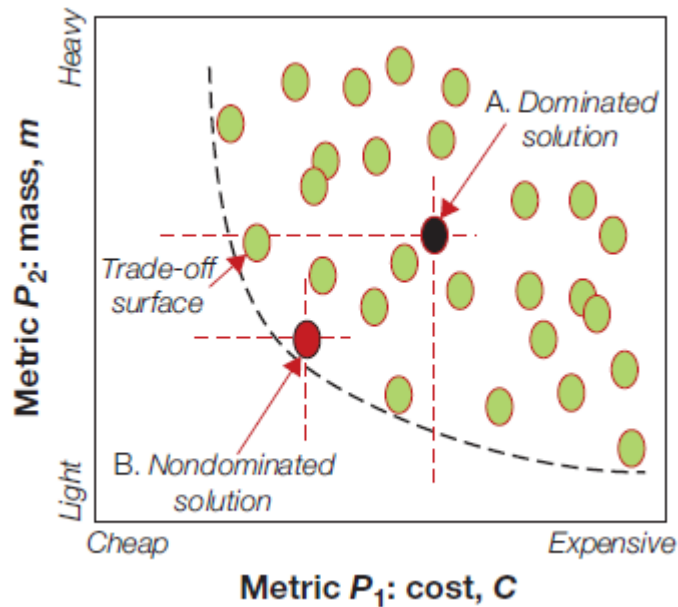


Figura 13 - Seleção com objetivos conflitantes (ASHBY, 2011)

2.7.2 FERRAMENTAS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS

Há diversas ferramentas que irão fornecer um verdadeiro auxílio na árdua tarefa de seleção de materiais. As opções são diversas, podendo variar de catálogos de matérias a softwares desenvolvidos especificamente para esta finalidade. Dentre os métodos mais conhecidos:

- **ASM Material Handbook:** são livros que fornecem uma grande fonte de dados sobre propriedades técnicas dos materiais baseados em ensaios realizados pela própria instituição (ASM International: Handbooks, 2020).
- **MatWeb – Material Property Data:** é uma base de dados gratuita com mais de 135 mil tabelas, que contém informações de uma gama diversa de propriedades de materiais. Este site permite realizar processos de triagem de materiais, onde são definidos intervalos para certas propriedades relevantes. Outro fator relevante é que as informações do banco de dados deste site são compatíveis com alguns softwares de CAD e CAE (MatWeb Property Data: About us, 2020).
- **CES – Cambridge Engineering Selector:** É um software desenvolvido com base nos diagramas de propriedades de materiais de Michael Ashby, este realiza um cruzamento de informações relacionadas aos materiais em um banco de dados com etapas progressivas de restrições, permitindo encontrar materiais que coincidem com os requisitos de projeto. O CES permite acessar, além de informações relativas as propriedades dos materiais, os processos de fabricação, propriedades ecológicas, durabilidade e custos. Por meio dessas informações, o CES gera gráficos e mapas que facilitam a visualização de dados. Logo,

pode se perceber que este software é uma excelente ferramenta para auxiliar a realização das etapas da seleção de materiais na metodologia Ashby.

3 SELEÇÃO DOS COMPONENTES AUTOMOTIVOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foram escolhidos cinco componentes automotivos, a saber: biela, mola de suspensão, volante de motor, pinça de freio e capô. A escolha desses componentes tem por finalidade explorar subsistemas distintos de um veículo automotivo, resultando em escolhas de materiais diferentes, haja vista que as aplicações desses componentes não são semelhantes e conseqüentemente os requisitos de projeto não serão os mesmos.

3.1 BIELA

A biela é um componente presente em motores de combustão interna que tem por finalidade promover a conexão entre o pistão e o virabrequim, permitindo transformar o movimento alternativo do pistão em movimento de rotação da cambota (Martins, 2003). A figura 14 ilustra o referido componente:



Figura 14 - Exemplo de biela automotiva, (<http://www.barros.com.br/noticia/qual-a-funcao-da-biela-no-motor>)

As causas de falha mais comuns nesses componentes mecânicos se dão por fadiga, dado que é elemento de máquina que opera sob condições de carregamento cíclico operando sob altas faixas de rotação. Outra forma de falha usual em bielas se dá por flambagem, considerando que sua haste é um corpo esbelto submetido a elevadas cargas trativas e compressivas, que ocasionalmente podem levar a estrutura a colapsar (de Lima e Silva, 2013).

3.2 MOLA DE SUSPENSÃO

As molas são componentes elásticos que exercem forças, ou torques, e absorvem energia, que em geral é armazenada e posteriormente liberada (Juvinal, 2008). As molas empregadas em suspensões de veículos de passeio normalmente possuem geometria helicoidal, e reagem sobretudo às oscilações verticais do veículo. Este componente de máquinas é determinante para o conforto e para a segurança de tráfego (BOSCH, 2004). A figura 15 ilustra o componente descrito:



Figura 15 - Exemplo de mola de suspensão, (<https://jmautopecasloja.com.br/produto/mola-suspensao-dianteira-esquerda-fabrini-fo0162m/>)

Sob a perspectiva de projeto mecânico, uma mola deve ser projetada para armazenar maior quantidade de energia possível dentro do regime de resiliência do material, para que não ocorram deformações plásticas (Yamada, 2007). Além disso, é interessante minimizar o volume de material, uma vez que será montada juntamente com o amortecedor, evitando assim possíveis interferências.

3.3 VOLANTE DE MOTOR

A grande variação típica da aceleração dentro de um motor pode causar oscilações significativas no torque requerido para manter a velocidade constante (ou quase constante). Uma forma conveniente e relativamente econômica de resolver essa situação é adição de um volante de inércia ao sistema (Norton, Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos, 2010). A figura 16 ilustra o componente supracitado



Figura 16 - Exemplo de Volante de Motor (<https://www.giganteautopeca.com.br/volante-do-motor-modelo-8-furos-375mm-125dentes-3520303905-mercedes-of-13151318-om-366>)

De maneira simplória, a função primária de um volante é armazenar energia, e sempre que possível, deseja-se fazer isso com a menor massa possível. A energia proveniente da rotação do volante exerce um carregamento trativo sobre o corpo, que não deve exceder a resistência a tração do material, caso contrário este irá colapsar.

3.4 PINÇA DE FREIO

A pinça de freio é um componente fundamental de um sistema de freio a disco. Neste tipo de sistema, o disco de freio gira de forma solidária à roda, e a pinça de freio permanece fixa na manga de eixo. Quando o pedal de freio é acionado, ocorre uma compressão na tubulação de fluido de freio, que por sua vez será responsável por acionar a pinça, que irá então promover o contato entre pastilhas e

disco, que irá resultar em um torque contrário ao movimento da roda (Limpert, 2011). Um exemplo de pinça de freio é ilustrado na figura 17:



Figura 17 - Exemplo de Pinça de Freio (<http://www.udikart.com.br/loja/produtos-novos/pinca-de-freio-flutuante-mega-2020/>)

Sob uma perspectiva estrutural, ao ser acionada, a pinça estará sujeita a um carregamento de flexão, então é relevante que a pinça possua uma resistência tal que garanta que este componente não venha a escoar, também é relevante que a pinça possua considerável rigidez para que não venha a sofrer deflexões excessivas. Outra característica, é que este componente possua elevada condutividade térmica, tendo em vista que grande parte na energia dissipada no processo de frenagem será convertida em calor.

3.5 CAPÔ

Este componente é instalado na parte frontal superior da carroceria, é um item que exerce diversas funções, desde servir como um elemento de proteção externa ao motor do automóvel, até influenciar na aerodinâmica do veículo, podendo diminuir a força de arrasto incidente sobre o mesmo (Nelson & Seyman, 2019). A figura 18 ilustra um exemplo de capô:



Figura 18 - Exemplo de capô (<https://www.jocar.com.br/produto/dodge/dakota/50408-capo-dianteiro-importado-dakota-1995-ate-2001-para-pintar-30846/>)

Além das funções citadas anteriormente, o capô exerce outra importante tarefa que é a de absorver energia (se deformar plasticamente) quando o veículo sofre algum tipo de colisão, de tal forma atenuar o impacto sobre o motorista e demais passageiros (Agarwal, Yadav, & Singh Khurana, 2019).

4 REQUISITOS DE PROJETO

4.1 TRADUÇÃO

Nesta etapa são apresentadas sobre as funções, restrições, objetivos e variáveis livres de cada um dos componentes pré-selecionados. Os requisitos são elencados da Tabela 1 à Tabela 5.

Tabela 1 - Requisitos definidos para a biela

Função	- Promover a conexão entre pistão e virabrequim; de tal forma que venha a converter o movimento; alternativo do pistão em movimento rotativo no eixo;
Restrições	- Não deve falhar por fadiga de alto ciclo; - Não deve falhar por flambagem elástica; - Comprimento de haste já definido pelo próprio curso dentro do cilindro;
Objetivos	- Minimizar massa;
Variáveis livres	- Escolha do material;

Tabela 2 - Requisitos definidos para a mola de suspensão

Função	-Armazenar energia elástica;
Restrições	-Não deve escoar; -Comprimento do suporte do amortecedor;
Objetivos	-Maximizar energia elástica armazenada por unidade de volume;
Variáveis Livres	-Escolha do material;

Tabela 3 - Requisitos definidos para o volante de motor

Função	-Armazenar energia cinética de rotação;
Restrições	- Diâmetro compatível com o da embreagem;
Objetivos	- Maximizar energia cinética por unidade de massa;
Variáveis Livres	- Escolha do material;

Tabela 4 - Requisitos definidos para a pinça de freio

Função	-Exerce função de carenagem;
Restrições	- Ser resistente a flexão; - Não sofrer deflexões excessivas. - Comprimento e profundidade limitados pelo disco de freio;
Objetivos	- Minimizar massa da pinça; - Maximizar transferência de calor pela pinça;
Variáveis Livres	- Escolha do material;

Tabela 5 - Requisitos definidos para o capô

Função	-Absorver energia de impacto;
Restrições	- Ter rigidez para se auto sustentar; -Deve possuir boa conformabilidade;
Objetivos	- Maximizar ductilidade com menor massa possível;
Variáveis Livres	- Escolha do material;

4.2 ÍNDICES DE MATERIAIS

4.2.1 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA BIELA

Sabendo que se deseja minimizar a massa, primeiramente procura-se definir uma equação que a caracterize, conforme a Eq. 8.

$$m = \beta AL\rho \quad (8)$$

Onde L é o comprimento da biela, ρ é a massa específica, e A é seção transversal, e β é uma constante conforme ilustra o esboço da atuação da força sobre a biela na figura 19.

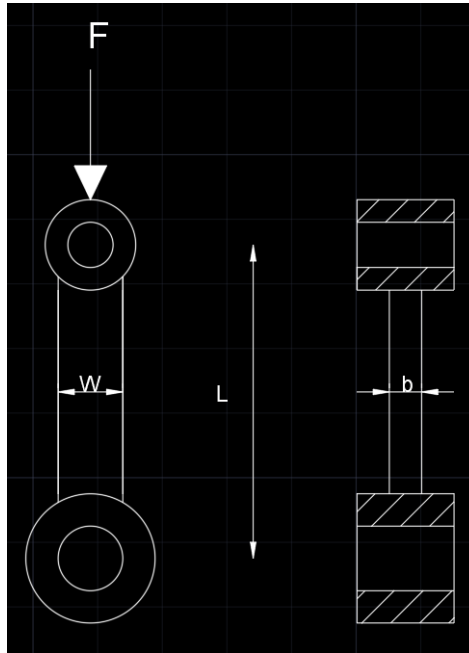


Figura 19 - Esboço de biela automotiva

Pelo critério de restrição à fadiga, temos que:

$$\frac{F}{A} \leq \sigma_e \quad (9)$$

Onde σ_e é a resistência a fadiga do material. Também é válido ressaltar que apesar F estar sendo representada como uma força compressiva (figura 18), esta força F também poderá ser de tração, desde que se leve em consideração que o cilindro estará no tempo de admissão no seu ciclo de combustão. Sendo assim, é possível afirmar que surgirá uma tensão alternada (σ_a) sobre a biela, mas por se tratar somente de um estudo de caso analítico, assumiu-se que os respectivos valores da tensão máxima (σ_{\max}) e da tensão mínima (σ_{\min}) são iguais em módulo, de tal forma que resulte numa tensão média (σ_{med}) nula.

Outro ponto relevante a ser comentado é o fato σ_e não representar, de fato, a resistência a fadiga do projeto da biela. Haja vista que em um projeto mecânico esse valor de resistência é alterado por diversos fatores, tais como: acabamento superficial da peça, temperatura de trabalho, confiabilidade e etc.

Marin propõe a seguinte ponderação para o cálculo da resistência mecânica de um componente:

$$\sigma_e = k_a k_b k_c k_d k_e \frac{1}{k_f} \sigma'_e \quad (10)$$

Para o presente caso, o mais complexo seria a determinação dos concentradores de tensão ocasionados pelos entalhes (k_e) e das respectivas sensibilidades que estes acarretam na peça (k_f). Uma possível solução para a resolução desse problema seria gerar um CAD 3D da peça, e tentar simular a dinâmica da biela em um software de CAE. Onde, basicamente, seria feita uma discretização por meio

de uma malha, seguido por um refinamento (caso seja necessário), e por fim aplicar as condições de contorno de projeto. Dessa maneira obtendo a resistência a fadiga necessária para o projeto.

Como a ambição do presente trabalho é apresentar somente a aplicação da *Metodologia Ashby* por meio de simples estudos de casos analíticos, foi desconsiderada a influência dos fatores externos sobre resistência a fadiga do material. Dessa forma, foi considerado que a resistência a fadiga do material é a resistência a fadiga de projeto ($\sigma_e = \sigma'_e$).

Combinando as eqs. 8 e 9 é possível obter-se uma equação que corresponda a uma massa que obedeça às restrições de fadiga. Resultando em:

$$m_1 = \beta FL\rho \left(\frac{\rho}{\sigma_e} \right) \quad (11)$$

Como pode se observar o termo entre parênteses da equação 11 são única e exclusivamente propriedades do material, temos então definido o nosso primeiro índice de material para a biela.

$$M1 = \left(\frac{\rho}{\sigma_e} \right) \quad (12)$$

Para a análise de flambagem, será adotada uma análise simplificada, assumindo que a biela é um elemento esbelto, de tal forma que satisfaça a critério de Euler. Como representado na equação 13

$$F \leq \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (13)$$

Sendo E o módulo de elasticidade, e I o momento de inércia. Considerando-se a haste da biela como uma seção retangular, temos que uma equação correspondente a inércia da biela:

$$I = \frac{b^3 w}{12} \quad (14)$$

É normal em projetos destes tipos representar a espessura em função da largura, é justamente o que se fará aqui, assumindo que $b = \alpha w$, sendo α uma constante de forma. Feita esta adaptação, e substituindo a eq. 14 na eq. 13, obtém-se uma segunda expressão para a massa, desta vez, satisfazendo o requisito de flambagem.

$$m_2 = \beta \left(\frac{12F}{\alpha \pi^2} \right)^{1/2} L^2 \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (15)$$

Nota-se que o item em parênteses mais à esquerda da equação 15 diz respeito somente aos materiais, com isso tem-se definido o segundo índice de material:

$$M_2 = \left(\frac{\rho}{E^{1/2}} \right) \quad (16)$$

Para garantir que a biela opere de forma segura, os critérios de fadiga e flambagem devem ser obedecidos. Para um dado comprimento L , a restrição de projeto implicará no maior valor entre m_1 e m_2 . Dado o expoente com que L é elevado nas equações anteriores, pode-se afirmar seguramente que bielas mais longas estram sujeitas a falha por flambagem, enquanto bielas mais curtas são mais suscetíveis à fadiga.

4.2.2 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA MOLA

Sabe-se que a energia potencial para uma mola é dada por:

$$E_p = \frac{1}{2} Kx^2 \quad (17)$$

A equação 17 pode ser reescrita em função da tensão de compressão a qual a mola é submetida ($\sigma = \frac{Kx^2}{A}$), e em função do módulo de elasticidade do material E , de tal forma que se obtenha uma equação de energia por unidade de volume (densidade energética), como mostrado na equação 18:

$$E_{pV} = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} \quad (18)$$

Para que a mola não falhe, o valor da tensão aplicada sob a mola não deve exceder a tensão de escoamento ($\sigma < \sigma_y$), desta maneira, a energia máxima é dada por:

$$E_{pV} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_y^2}{E} \quad (19)$$

Sendo assim, pode-se definir o índice de material para a mola como:

$$M_1 = \frac{\sigma_y^2}{E} \quad (20)$$

De maneira tal que, ao classificar os materiais que passarem pelo processo de triagem obter-se-á os materiais com maior capacidade potencial de energia elástica sob unidade de volume.

4.2.3 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA VOLANTE DE MOTOR

Considerando que o único movimento que o volante exerce é o de rotação em torno do seu eixo, então pode-se dizer que a energia armazenada neste é dada pela energia cinética de rotação, como expresso na equação 21.

$$E_{cr} = \frac{1}{2} J\omega^2 \quad (21)$$

O momento polar de inércia do disco é dado por:

$$J = \frac{\pi}{2} \rho R^4 t \quad (22)$$

Onde t é a espessura do volante, conforme ilustrado na figura 20. É bem verdade que a equação 21 não se adequa perfeitamente ao esquema da figura 20, uma vez que considera que é uma seção cheia, porém para fins de estudo de caso não implicará em mudanças significativas no resultado.

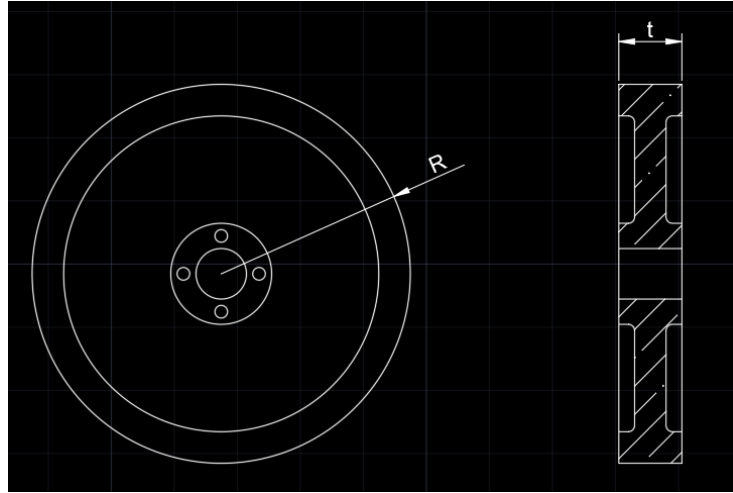


Figura 20 - Esquema do volante de motor

Substituindo a eq. (22) na eq. (21), obtém-se:

$$E_{cr} = \frac{1}{4} \pi R^4 t \omega^2 \quad (23)$$

Já a massa do volante de motor, pode ser descrita como o produto entre o volume deste e densidade do material que é fabricado.

$$m = \pi R^2 t \rho \quad (24)$$

Como o objetivo deste projeto é maximizar a energia cinética por unidade de massa, então por meio da razão entre a eq. (23) e a eq. (24), obtém-se uma equação que irá descrever tal objetivo.

$$\frac{E_{cr}}{m} = \frac{1}{4} R^2 \omega^2 \quad (25)$$

Segundo *Rosa Nishida*, a tensão máxima em um disco giratório de espessura uniforme é dada por:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \left(\frac{3 + \nu}{8} \right) \rho R^2 \omega^2 \quad (26)$$

Assumindo que o volante será fabricado com aço, pode-se assumir que o coeficiente de Poisson é da ordem de 0,3 $\left(\nu = \frac{1}{3} \right)$, reescrevendo a eq. (25):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{5}{12} \rho R^2 \omega^2 \cong \rho R^2 \omega^2 \quad (27)$$

Por meio desta equação é definido um limite superior para o produto do raio do volante e a velocidade angular, substituindo a eq. (27) na eq. (25) obtém-se:

$$\frac{E_{cr}}{m} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\rho} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_y}{\rho} \right) \quad (28)$$

Após essa análise, pode-se definir que o índice de material para um volante será:

$$M_1 = \frac{\sigma_y}{\rho} \quad (29)$$

4.2.4 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA PINÇA DE FREIO

Um esquema simplificado da ação das forças sobre um sistema de freio a disco é exemplificado na figura 21.

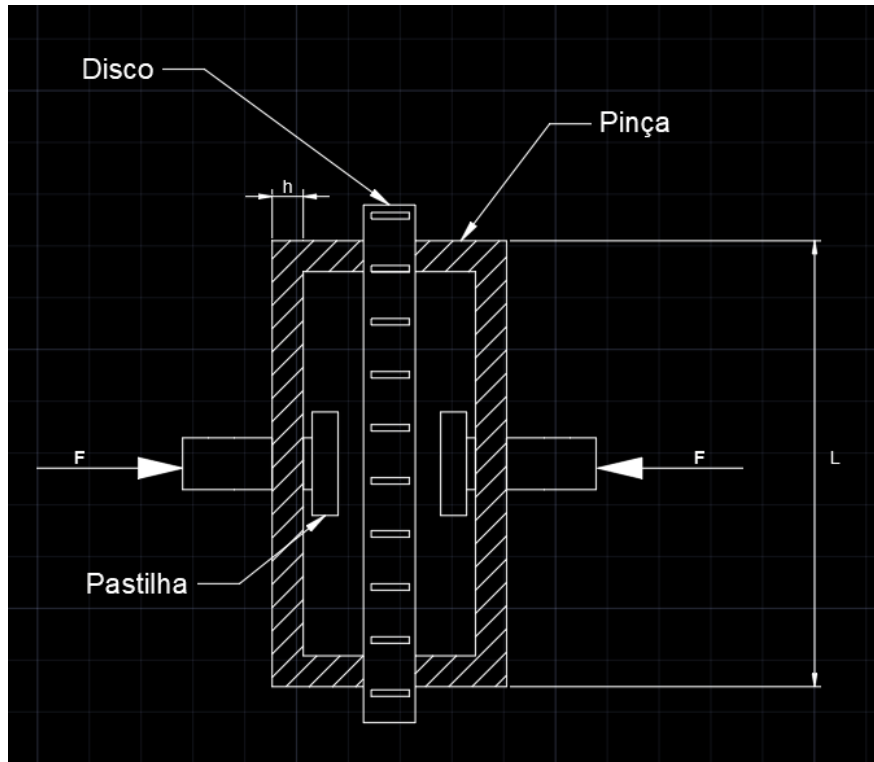


Figura 21 - Esquema de freio a disco

De forma idealizada, a pinça de freio pode ser entendida como duas vigas de comprimento L e espessura h . De tal forma, que quando o freio é acionado, cada uma das vigas estará submetida a um carregamento de flexão. Como ilustrado na figura 22.

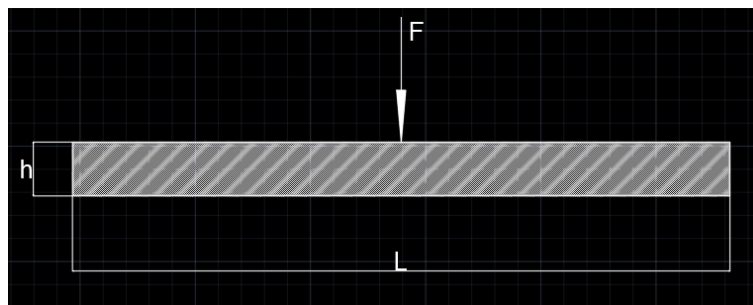


Figura 22- Viga sob carregamento de flexão

A massa da pinça de freio pode ser representada pela seguinte equação:

$$m_A = h\rho \quad (30)$$

Onde h é a espessura da viga (figura 22), onde a eq. 30 irá apresentar uma unidade de massa por unidade de área (kg/m^2). Outra informação que interessa é a transferência de calor ao longo da pinça (objetivo de projeto), o fluxo de calor por condução por unidade de área pode ser expresso pela eq. 31.

$$\dot{Q}_A = k \frac{\Delta T}{h} \quad (31)$$

Onde k é a condutividade do material e ΔT é a diferença de temperatura entre as superfícies.

Para garantir que a pinça seja resistente, e não venha falhar por uma deflexão excessiva, deve-se entender como se dá o deslocamento ao longo desta, para isso, foi utilizado a equação da linha elástica:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (32)$$

$$y = \frac{FL^3}{C_1EI} = \frac{ML^2}{C_1EI} \quad (33)$$

Onde y corresponde ao valor da deflexão e C_1 é uma função que depende da distribuição de carga ao longo da viga. Por meio da eq. 33 é possível se inferir a rigidez da viga, que logicamente deve ser maior ou igual a rigidez necessária no projeto para que não venha a falhar, como fica explícito na eq.34.

$$S = \frac{C_1EI}{L^3} \geq S^* \quad (34)$$

Onde S^* é a rigidez requerida pela pinça de freio. Considerando a viga como uma sessão retangular, tem-se que $I = \frac{bh^3}{12}$, logo, pode-se de reescrever a eq. 35 como:

$$\frac{C_1Ebh^3}{12L^3} \geq S^* \quad (35)$$

Isolando-se h :

$$h \geq \left(\frac{12S^*}{C_1Eb} \right)^{1/3} L \quad (36)$$

Substituindo a eq. 36 nas eqs. 30 e 31, é possível se obter uma equação “definitiva” para a massa e para a transferência de calor por condução, de onde podem ser obtidos os índices de material. Resultando em:

$$m_A = \left(\frac{12S^*}{C_1b} \right)^{1/3} L \left(\frac{\rho}{E^{1/3}} \right) \quad (37)$$

$$\dot{Q}_A = \frac{\Delta T}{L} \left(\frac{C_1b}{12S^*} \right)^{1/3} (kE^{1/3}) \quad (38)$$

De tal forma que, ao se estabelecer como objetivo de projeto para uma pinça de freio a minimização da massa e maximização da transferência de calor, tem-se como resultado os índices de mérito retirados das eqs. 37 e 38.

$$M_1 = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (39)$$

$$M_2 = kE^{1/3} \quad (40)$$

4.2.5 ÍNDICES DE MATERIAIS PARA O CAPÔ DE UM AUTOMÓVEL

De maneira simplificada, um capô pode ser entendido como um painel submetido a um carregamento de flexão, tal qual mostrado no tópico 2.7. Assim sendo, foram definidos dois índices de material. Um para maximizar a absorção de energia de impacto (maior ductilidade), e outro para garantir uma rigidez, minimamente suficiente, para a autossustentação do capô com a menor massa possível. Sendo os critérios apresentados nas eqs. 41 e 42:

$$M_1 = \epsilon \quad (41)$$

$$M_2 = \frac{E^{1/3}}{\rho} \quad (42)$$

Todo o processo de dedução é similar ao apresentado no tópico 2.7, para evitar a redundância, aqui será somente apresentado a índice a ser utilizado.

5 TRIAGEM

O processo de triagem consiste em separar, do universo de todos os materiais disponíveis, aqueles que não atendem aos requisitos. Segundo a Metodologia Ashby, essa separação é feita aplicando-se as restrições de projeto. Com base nessas restrições, define-se no Diagrama de Propriedades a região de busca, ou seja, aquela região onde se encontram os materiais que passaram pelo crivo da triagem, logo, atendem às restrições impostas.

5.1 BIELA

5.1.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DA BIELA

Para a realização deste estudo de caso foram utilizados dados da dissertação de *Rodrigues*, que teve por finalidade desenvolver um motor monocilíndrico (por código M3165) de ciclo Atkinson para um veículo protótipo (XC20i) que disputou a competição Shell Eco-Marathon de 2010. As figuras 23 e 24 ilustram o motor.

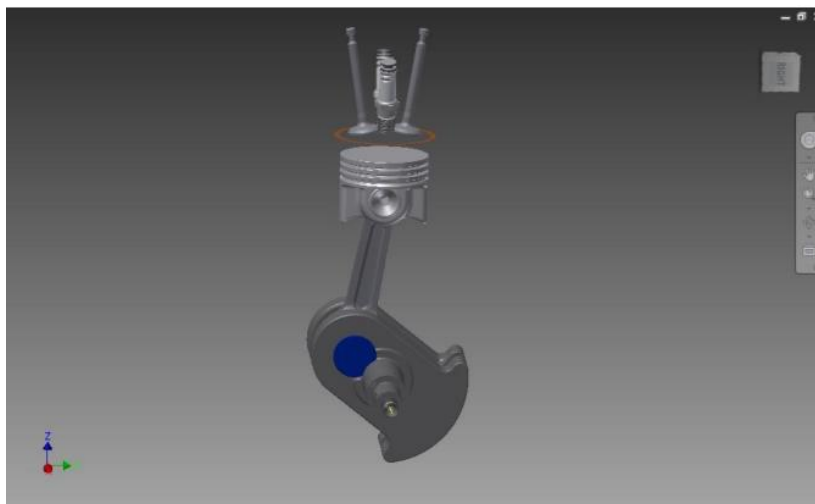
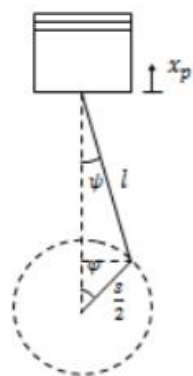


Figura 23 - Sistema pistão-biela-virabrequim (RODRIGUES, 2011)



Figura 24 - Motor M3165 depois de montado (RODRIGUES, 2011)

O carregamento que atua sob uma biela automotiva é oriundo da força aplicada pelos gases de combustão na cabeça do pistão. Uma simplificação da dinâmica desse sistema foi proposta por *Basshuysen e Schäfer*, conforme o esquema da figura 25.



Definições:

x_p – posição do pistão

s – curso do pistão

l – comprimento da biela

φ – posição angular do virabrequim

ψ – ângulo da biela

Figura 25 - Geometria da árvore de potência (BASSHUYSEN & SCHÄFER, 2004)

E as forças atuantes nesse sistema estão descritas nas equações 43 e 44 (Basshuysen & Schäfer, 2004):

$$F_{comp} = p_{max} A_p \quad (43)$$

$$F_{trac} = m_p \ddot{x}_{pmax}; \ddot{x}_{pmax} = \frac{s}{2} \omega_{max}^2 \left(\cos\varphi + \frac{r}{l} \cos 2\varphi \right) \quad (44)$$

Onde F_{comp} é a força de compressão, F_{trac} é a força de tração, p_{max} é a pressão máxima de combustão, A_p é a área da cabeça do pistão e ω é a rotação do motor.

No entanto, vale lembrar que conforme já discutido no tópico 4.2.1, as forças de compressão e tração serão tidas como iguais ($\sigma_{max} = \sigma_{min}$), de tal forma que para fins de cálculo foi usado somente a eq. 43 (referente a força compressiva), tendo em vista que esta será responsável pela condição mais crítica do projeto.

Para o motor M3165, *Rodrigues* obteve os valores p_{max} para diferentes faixas de rotação. Os valores são apresentados na tabela 6.

Tabela 6 - Valores máximos de densidade de fluxo de calor, Q_{emb} , e de pressão máxima na câmara de combustão, p_{max} , para cada velocidade de rotação do motor durante o ciclo de funcionamento (RODRIGUES, 2011)

n [rpm]	Q_{emb} [W/m ²]	p_{max} [MPa]
1000	-114974.7	11.45
1500	-162142.1	11.34
2000	-206973.4	11.52
2500	-252451.0	11.82
3000	-292694.5	11.64
3500	-332106.9	11.72
4000	-368213.3	11.47
4500	-403265.7	11.45
5000	-443829.5	11.40
5500	-473567.1	11.23
6000	-498384.2	10.72

Percebe-se que o maior valor da pressão ocorre para $n = 2500$ rpm. Sabendo o valor de p_{max} crítico, e considerando $A_p = \frac{\pi D_{pistão}^2}{4}$, onde o valor de $D_{pistão}$ é retirado da tabela presente no Anexo A do presente trabalho. Logo, é possível calcular o valor mais elevado de F_{comp} .

$$F_{comp} = 11,45 \cdot \frac{\pi \cdot 33^2}{4} = 10,1 \text{ kN} \quad (45)$$

Tendo posse do valor da força compressiva atuante sobre a biela, é possível agora levantar, de maneira quantitativa, os parâmetros de restrição definidos na Tabela 1, para então, de fato, poder ser realizada a triagem.

Observando a restrição de fadiga:

$$\frac{10,1 \cdot 10^3}{6,7 \cdot 3,8} < \sigma_e \quad (46)$$

$$\sigma_e > 396,7 \text{ MPa}$$

Já para os requisitos de flambagem:

$$10,1 \cdot 10^3 < \frac{\pi^2 \cdot E \cdot (3,06 \cdot 10^{-11})}{(58 \cdot 10^{-3})^2} \quad (47)$$

$$E > 112,6 \text{ GPa}$$

Através desses parâmetros, agora é possível realizar a triagem primária de materiais no software *Granta-EduPack*.

5.1.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA BIELA NO GRANTA-EDUPACK

No software *Granta-EduPack*, foram impostos os argumentos calculados no tópico 5.1.1. Além disso, foi inserida uma restrição de temperatura de trabalho, que segundo *Furuham* (1966), para uma biela de um motor de combustão interna, é um valor médio de 140°C. Também foi inserido um filtro que garanta a capacidade do material ser capaz de ser submetido ao processo de conformação a quente, assumindo que a peça será fabricada por forjamento a quente. Assim, foi plotado o diagrama de materiais que foram aprovados, primariamente, na triagem. Conforme ilustra a figura 26.

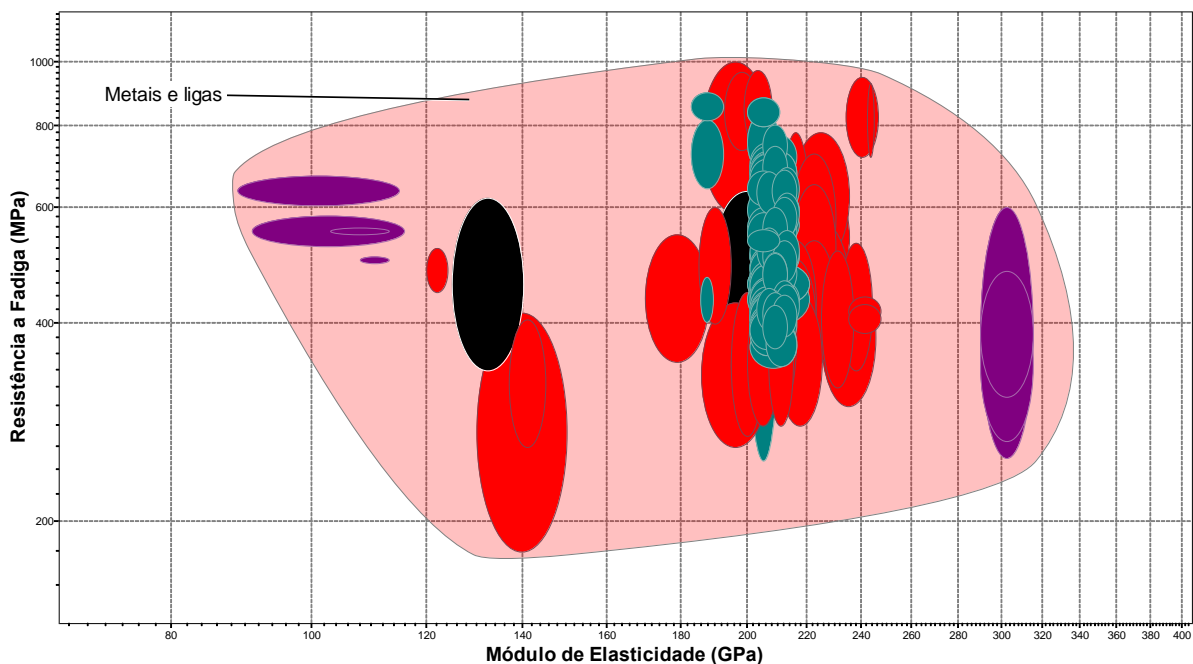


Figura 26 - Diagrama de materiais para a biela após a triagem

Ainda sobre o diagrama de materiais, vale ressaltar que as escolhas das propriedades dos eixos tiveram como base os requisitos de projeto. Além disso, é válido lembrar que os eixos estão em escala logarítmica (log-log).

Após a etapa de triagem, foram obtidos 178 materiais candidatos, que irão ser classificados na próxima etapa.

5.2 MOLA

5.2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA MOLA

Os dados utilizados para realização no presente estudo de caso foram extraídos dos trabalhos de *Ruthes* (2016), onde este avaliou a dinâmica de suspensão de um Fiat Uno modelo 2006. A figura 27 ilustra as molas do veículo.

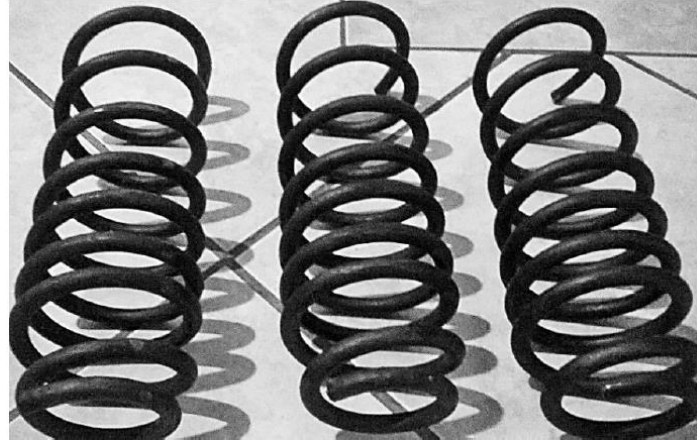


Figura 27 - Molas Helicoidais de compressão utilizadas para aplicação em suspensão automotiva de um Fiat Uno, fabricadas pela a empresa RNA Fabrini. (RUTHES, 2016)

Alguns dados coletados por *Ruthes* concernentes a suspensão dianteira são apresentados nas tabelas 7 :

Tabela 7 - Variáveis da suspensão dianteira de um Fiat Uno (RUTHES, 2016)

Variáveis da Suspensão Dianteira	
Massa suspensa	520 kg
Massa não suspensa	63 kg
Rigidez do Pneu	$1,9 \cdot 10^5$ N/m
Rigidez das Molas	$1,688 \cdot 10^4$ N/m
Constante de Amortecimento	1554 N.s/m

Outros dados obtidos por *Ruthes* no catálogo da RNA Fabrini, conforme a tabela 8:

Tabela 8 - Dados das molas dianteiras (RUTHES, 2016)

Dados das Molas Dianteiras	
Diâmetro médio	0,1 m
Diâmetro de fio	0,01 m
Altura	0,3 m

Para o projeto de uma mola helicoidal de compressão sob carregamento estático, *Norton* prevê a seguinte equação para o cálculo da tensão atuante:

$$\tau = K_s \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (48)$$

Onde F é força de compressão atuante, D é o diâmetro médio, d é o diâmetro de fio e K_s é um fator de cisalhamento, que calculado pela seguinte relação:

$$K_s = 1 + \frac{0,5}{C} \quad (49)$$

Na qual C é o denominado índice de mola, que nada mais é do que o quociente de D sob d .

Com base nos dados apresentados nas tabelas 7 e 8 e partindo da primícia que a massa suspensa suportada pela suspensão dianteira será igualmente distribuída entre as duas torres dianteiras do veículo, pode-se calcular a tensão de cisalhamento

$$\tau = 1,05 \frac{8.2600.0,1}{\pi.0,01^3} \cong 695,54MPa \quad (50)$$

A partir disso, pode ser definido de forma quantitativa o requisito de projeto estabelecido na tabela 3. De tal forma que o material deve ter uma tensão de resistência ao escoamento por cisalhamento (σ_{ys}) que garanta que a mola não irá escoar. Logo:

$$\sigma_{ys} > 695,54MPa \quad (51)$$

Para um material dúctil, sabe-se que $\sigma_{ys} = 0,577\sigma_y$. Logo:

$$\sigma_y = 1205,44 MPa \quad (52)$$

Por meio a desse parâmetro, agora é possível dar início a triagem primária de materiais no software *Granta-EduPack*.

5.2.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA MOLA NO GRANTA-EDUPACK

No software *Granta-EduPack*, foram impostos os argumentos calculados no tópico 5.2.1. Além disso, foi inserida uma restrição de capacidade do material ser capaz de ser submetido ao processo de conformação a quente, que segundo *Chiaverini* (1986), trefilação é o processo de fabricação utilizado para a fabricação de molas helicoidais de compressão. Dessa forma, foi plotado o diagrama de materiais, sobre a forma de um gráfico de coluna, conforme ilustra a figura 28.



Figura 28 - Diagrama de materiais para a mola após a triagem

Como resultado da triagem foram obtidos 89 materiais que agora poderão ser classificados.

5.3 VOLANTE DO MOTOR

5.3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA O VOLANTE DO MOTOR

Os parâmetros utilizados neste tópico têm como referência trabalho desenvolvido por *Weller* (2018), e teve por finalidade fazer um estudo comparativo entre sistemas de transmissão com embreagem simples e sistemas de dupla embreagem.

Para um motor Volkswagen EA888, *Weller* obteve o gráfico de torque e potência presente na figura 29:

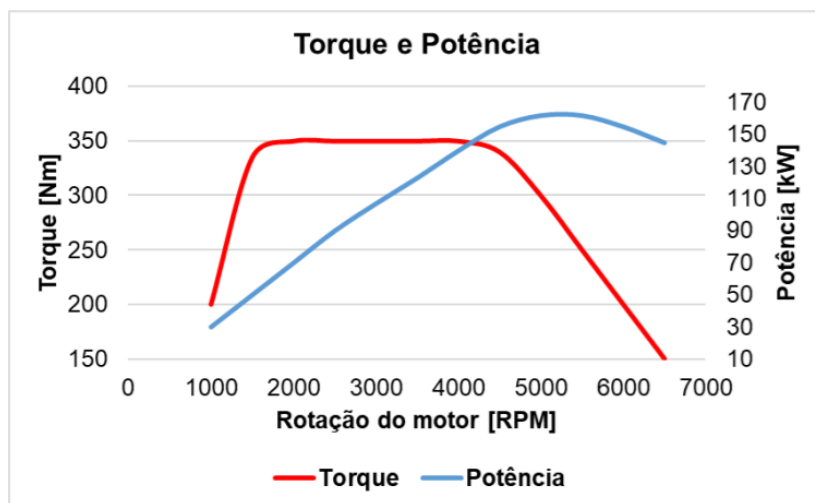


Figura 29 - Curva de Torque e Potência para motor EA888 (WELLER 2018)

Por meio do gráfico presente na figura 29 é possível perceber que o valor máximo de torque é igual a 350 Nm.

Do catálogo da fabricante de peças *Luk*, constata-se que o diâmetro externo do disco da embreagem para o motor EA888 é igual 340 mm, assumindo que o diâmetro do volante é aproximadamente 15% maior que o diâmetro do disco, tem-se como resultado um diâmetro igual 391mm para o volante.

Com base nas informações obtidas é possível calcular a tensão cisalhante máxima que o volante está submetido através da equação 53:

$$\tau_{max} = \frac{T \cdot c}{J} \quad (53)$$

Sendo T o torque atuante no corpo, c o raio e J o momento polar de inércia.

Onde o momento polar de inércia para uma (J) é calculado por:

$$J = \frac{\pi}{2} c^4 \quad (54)$$

Ao se efetuarem as contas, obtém um $\tau_{max} = 0,3 \text{ MPa}$ como valor crítico para a tensão de cisalhamento.

5.3.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA O VOLANTE NO GRANTA-EDUPACK

Devido ao fato de a geometria do volante conter dentes e poder contar com ranhuras de alívio interno, como ilustra a figura 30, foi imposta uma restrição de fabricação por usinagem.



Figura 30 - Volante de motor aliviado (<https://www.allpartsnet.com.br/volante-motor-aliviado-exedy-honda-civic-si-2-0-2006-2011-vmho0002/p>)

Assim, foi plotado o diagrama de materiais que atendem os critérios definidos, conforme a figura 31:

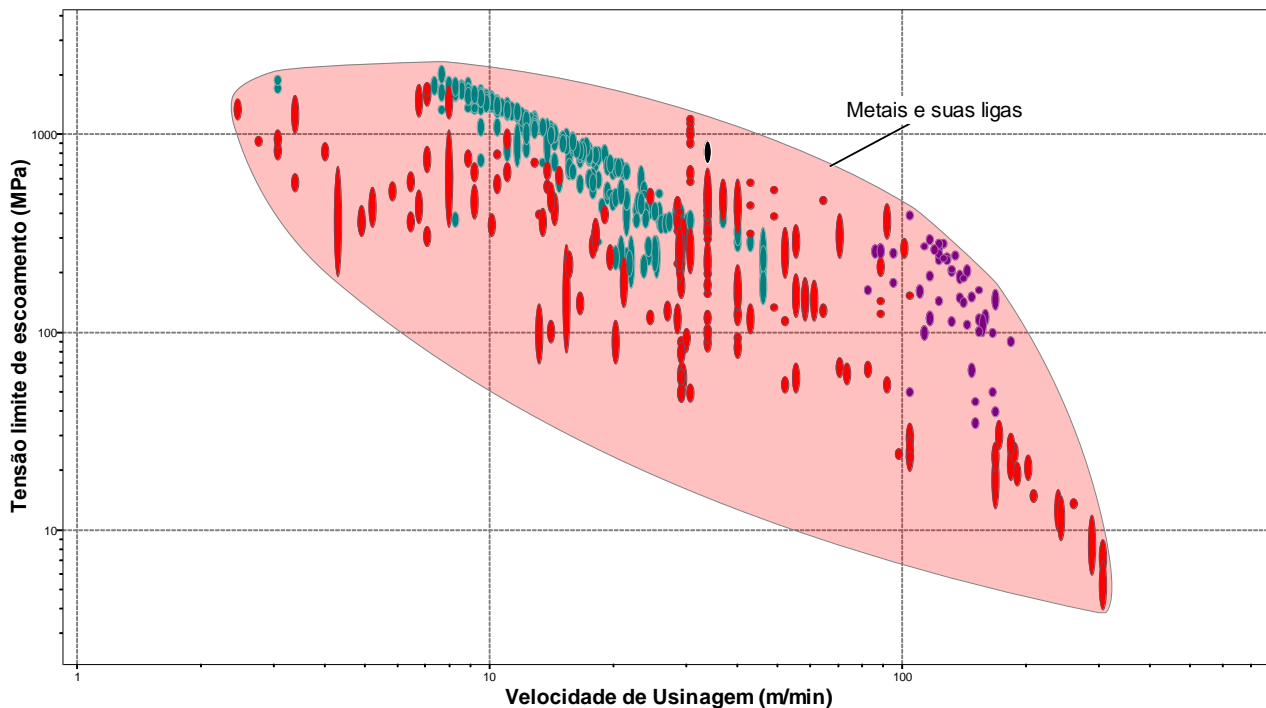


Figura 31 - Diagrama de materiais para volante após a triagem.

Após a triagem, restaram 426 materiais que agora serão devidamente classificados.

5.4 PINÇA DE FREIO

5.4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA A PINÇA DE FREIO

Nessa etapa, foram utilizados os resultados obtidos por TROCADO (2017), que teve por objetivo dimensionar um conjunto de pinças de freio para um veículo tipo mini baja SAE de competição utilizando a abordagem de elementos finitos. A figura 32 permite visualizar a modelagem da pinça.

Segundo *Trocado*, a tensão crítica é a tensão exercida pela pastilha de freio sobre o corpo da pinça. Com isso ele obteve os resultados presentes na tabela 9:

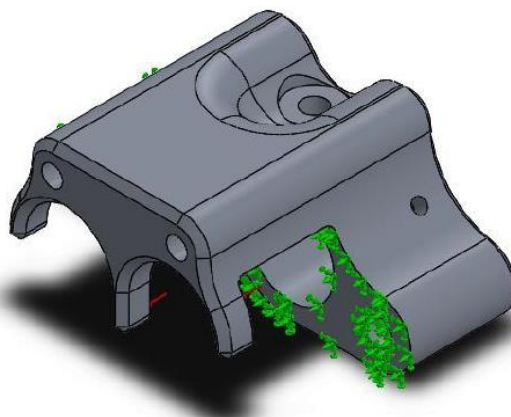


Figura 32 - Análise da tensão exercida pela pastilha de freio sobre o corpo da pinça (TROCADO, 2017)

Tabela 9 - Resultado da análise de tensão (TROCADO, 2017)

<i>Análise Estática 2 - Resultado</i>	
Critério de escoamento	Von Mises
Tensão	2,52611 MPa
Deformação equivalente	$1,58 * 10^{-3}$ mm
Deslocamento	$1,11 * 10^{-1}$ mm
Tensão máxima	148,60 MPa
Fator de segurança mínimo	1,02

5.4.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA A PINÇA DE FREIO NO GRANTA-EDUPACK

Em seu trabalho, *Trocado* relata que as pinças seriam fabricadas por fundição. Com base nessa afirmação, foi imposto como restrição a capacidade do material ser submetido a tal processo de fabricação. A figura 33 ilustra o resultado obtido.



Figura 33 - Diagrama de materiais para pinça de freio após a triagem

Após a triagem restaram 99 materiais que agora poderão ser classificados.

5.5 CAPÔ AUTOMOTIVO

5.5.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA CAPÔ AUTOMOTIVO

Foi selecionado o trabalho de SHELESKI (2015), que tem por objetivo fazer um estudo de caso para otimizar a carenagem lateral de uma colhedora da *John Deere* para torná-la mais leve. A figura 34 ilustra o modelo de carenagem.



Figura 34 - Carenagem lateral colhedora John Deere (SCHELESKI, 2015)

Segundo Sheleski, a carenagem deve resistir a choques estruturais, ser rígida o suficiente para sustentar o próprio peso e não sofrer deflexões e ter tenacidade a fratura mínima de $1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$.

5.5.2 TRIAGEM DOS MATERIAIS PARA CAPÔ AUTOMOTIVO NO GRANTA-EDUPACK

Foi inserido também um filtro que garante ao material triado a capacidade de sofrer processo de estampagem, haja vista que usualmente esse é método de fabricação empregado para produção da respectiva peça. O resultado obtido é apresentado na figura 35.

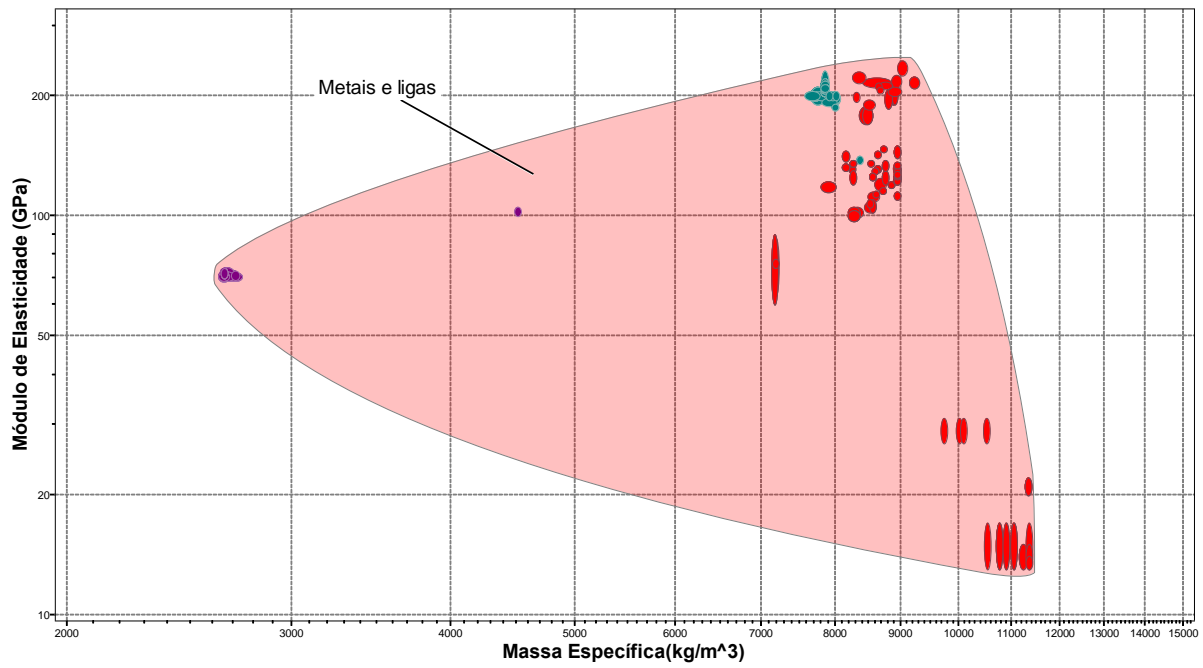


Figura 35 - Diagrama de materiais para carenagem lateral de colhedora após a triagem

Após o processo de triagem restaram 408 materiais, que agora poderão ser devidamente classificados.

6 CLASSIFICAÇÃO E SELEÇÃO PARCIAL

Nessa etapa do projeto serão selecionados um grupo de 5 materiais que atendam aos requisitos de projeto, tendo como parâmetros de classificação os índices de materiais definidos no tópico 4.2.

6.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A BIELA

Para a biela, foram definidos 2 índices de material visando a redução de massa. O primeiro considerando que a causa de falha crítica é por fadiga ($M_1 = \left(\frac{\rho}{\sigma_e}\right)$) e o segundo considerando que a falha ocorrerá por flambagem ($M_2 = \left(\frac{\rho}{E^{1/2}}\right)$). Aplicando o respectivo índice de material (conforme ilustrado nas figuras 36 e 37) sobre os materiais que foram considerados aptos pelo processo de triagem, foram selecionados os candidatos apresentados nas tabelas 10 e 11:

Tabela 10 - Materiais Selecionados para biela (falha por fadiga)

Materiais Selecionados
Níquel-berílio alloy, Alloy 440, endurecido
Cobalt-base-superalloy, Elgiloy/Phynox, cold worked
Aço Maraging 300
Titânio, liga beta, Ti-15Mo-3Al-3Nb
Berílio S-200

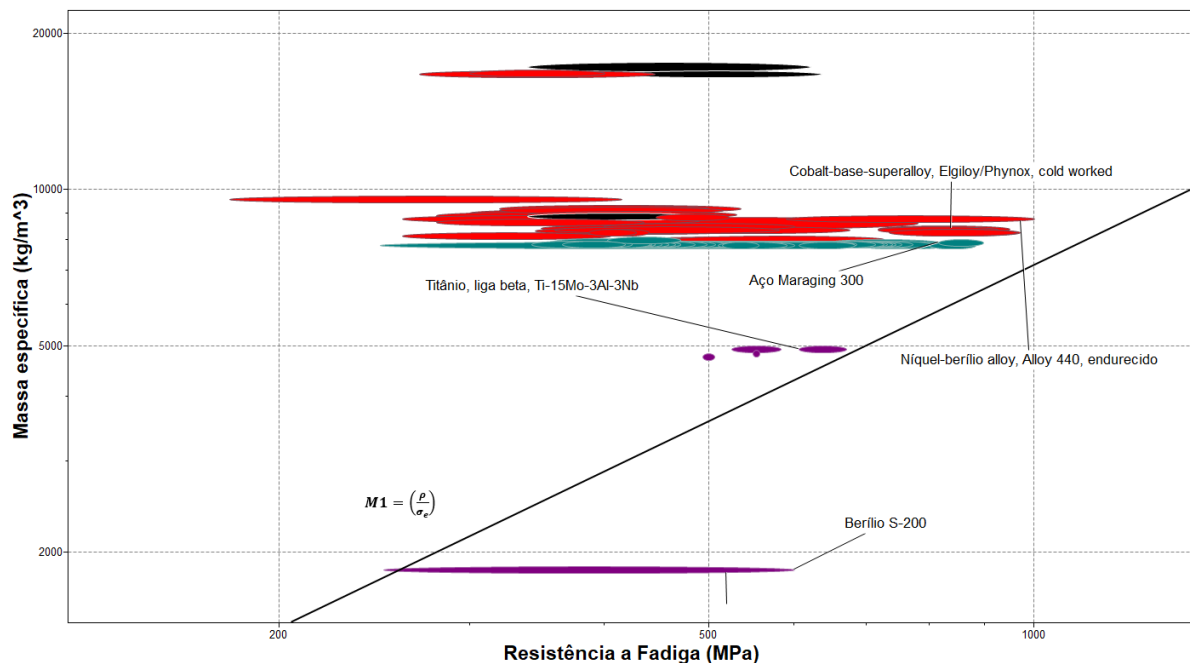


Figura 36 - Diagrama de classificação da biela (falha por fadiga)

Tabela 11 - Materiais Seleccionados para biela (falha por flambagem)

Materiais Seleccionados
Cobalt-base-superalloy CCM
Níquel-Co-Cr alloy UDIMET 700
Cobalt-base-superalloy, multiphase, MP35N, solution treated, cold drawn & aged
Aço Martensítico YS1200
Aço de baixo carbono AISI 5140

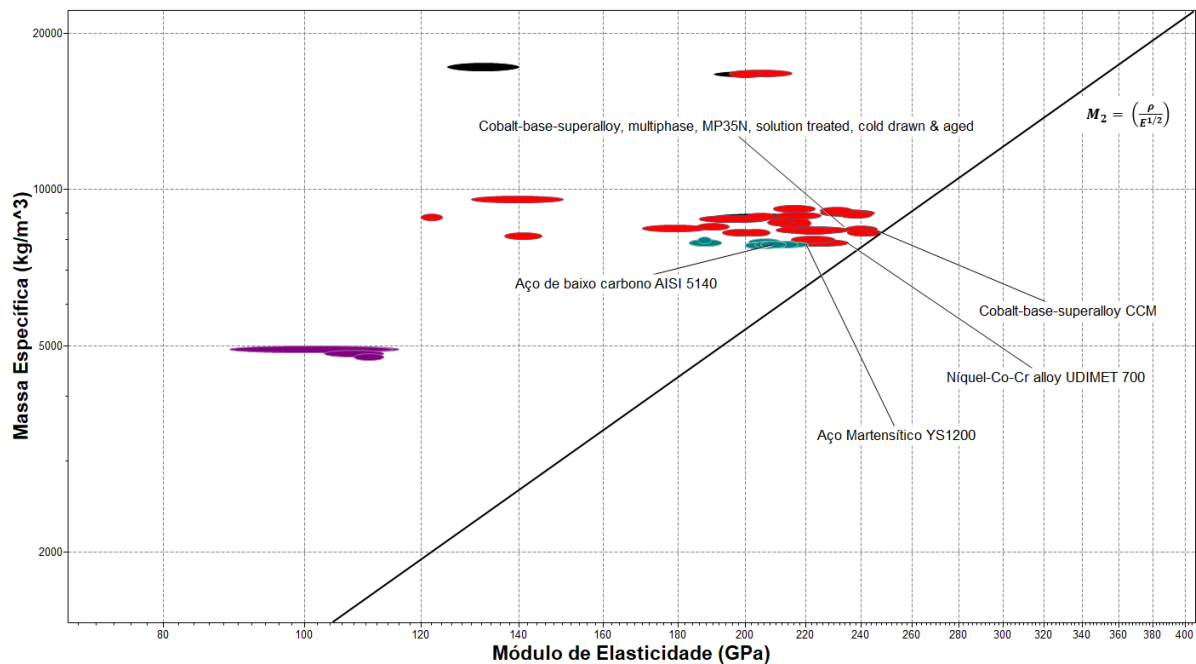


Figura 37 - Diagrama de classificação da biela (falha por flambagem)

Após essa etapa, os materiais seleccionados seguirão para etapa de documentação e escolha final.

6.2 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A MOLA

Para a mola, foi definido como objetivo maximizar a quantidade de energia elástica por unidade de massa, o que resultou no índice de material $M_1 = \frac{\sigma_y^2}{E}$. Aplicando o respectivo índice de material (conforme ilustrado na figura 38) sobre os materiais que foram considerados aptos pelo processo de triagem, foram seleccionados os candidatos da tabela 12:

Tabela 12 - Materiais seleccionados para mola

Materiais Seleccionados
Aço AISI 9255
Aço AISI 5160
Aço AISI 5140
Aço AISI 50B60
Aço Maraging 300

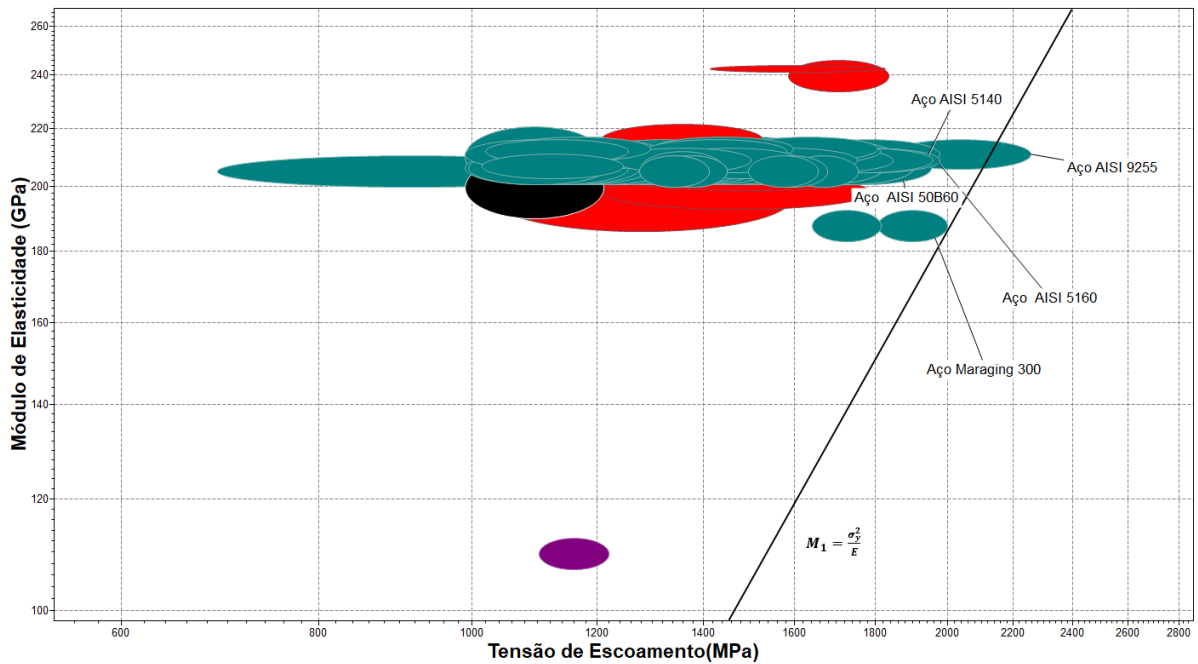


Figura 38 - Diagrama de classificação para mola

Após essa etapa, os materiais selecionados seguirão para etapa de documentação e escolha final.

6.3 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA O VOLANTE DE MOTOR

Para a mola, foi definido como objetivo maximizar a quantidade de energia cinética por unidade de volume, o que resultou no índice de material $M_1 = \frac{\sigma_y}{\rho}$. Aplicando o respectivo índice de material sobre os materiais (conforme ilustrado na figura 39) que foram considerados aptos pelo processo de triagem, foram selecionados os candidatos da tabela 13:

Tabela 13 - Materiais selecionados para mola

Materiais Selecionados
Aço AISI 9255
Aço AISI 50B60
Aço Maraging 250
Aço AISI 5150
Aço AISI 4340

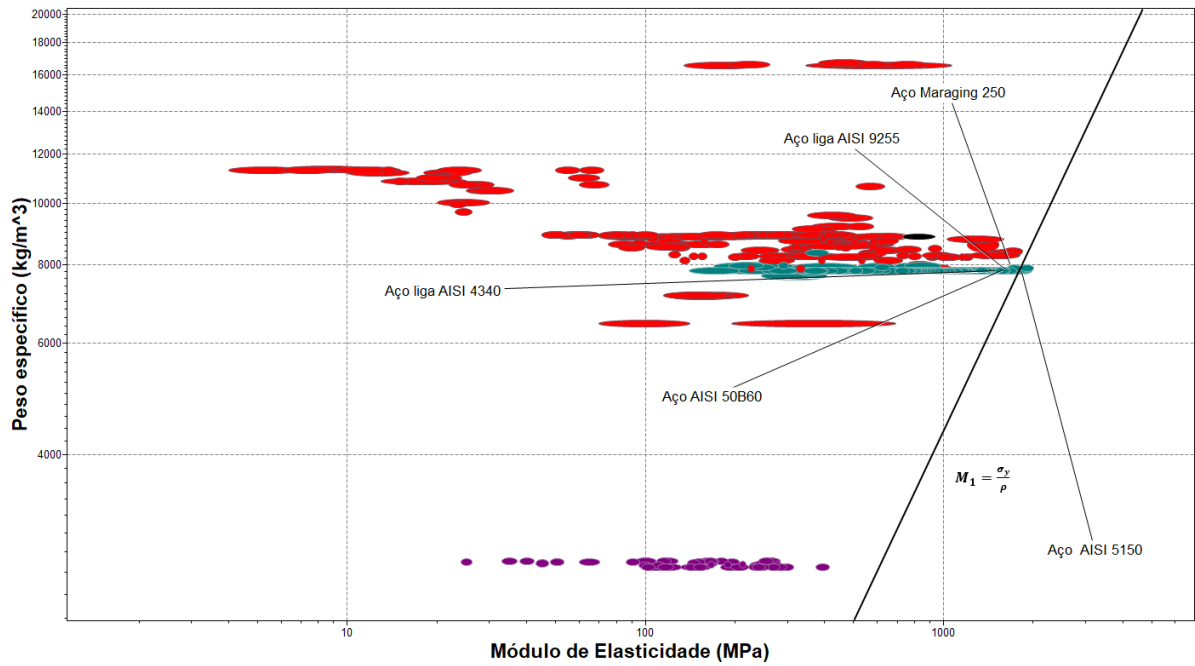


Figura 39 - Diagrama de classificação para volante de motor

Após essa etapa, os materiais selecionados seguirão para etapa de documentação e escolha final.

6.4 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA A PINÇA DE FREIO

Para a pinça de freio, foram definidos 2 índices de material. O primeiro índice ($M_1 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$) tem por finalidade reduzir a massa da pinça, já o segundo ($M_2 = kE^{1/3}$), tem por objetivo maximizar a transferência de calor. Aplicando os respectivos índices de materiais (conforme ilustrado na figura 40 e 41) sobre os materiais que foram considerados aptos pelo processo de triagem, foram selecionados os candidatos das tabelas 14 e 15:

Tabela 14 - Materiais Selecionados para pinça de freio (minimizar massa)

Materiais Selecionados
Superalloy MAR-M 302
Alloy M 220C
Aço SAE 4130
Aço ASTM CA-6NM
Aço ASTM CH-20

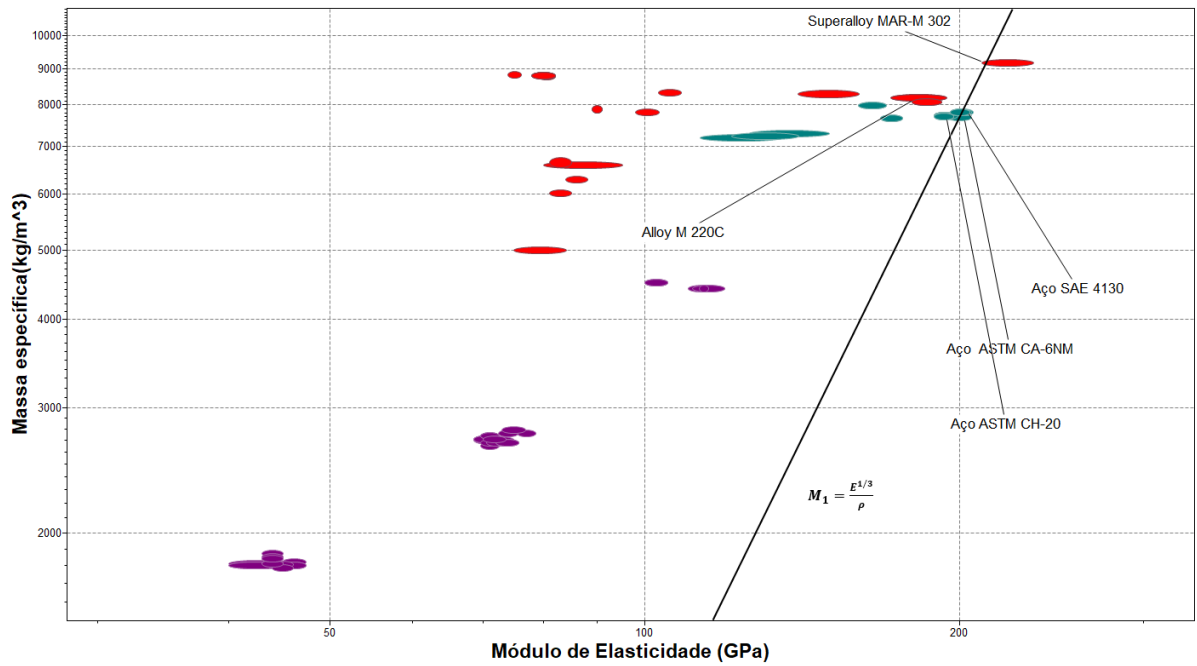


Figura 40 -Diagrama de classificação para pinça de freio (minimizar massa)

Tabela 15 - Materiais Seleccionados para pinça de freio (maximizar transferência de calor)

Materiais Seleccionados
Alumínio A357
Alumínio D357
Alumínio A356
Alumínio A355
Alumínio C355

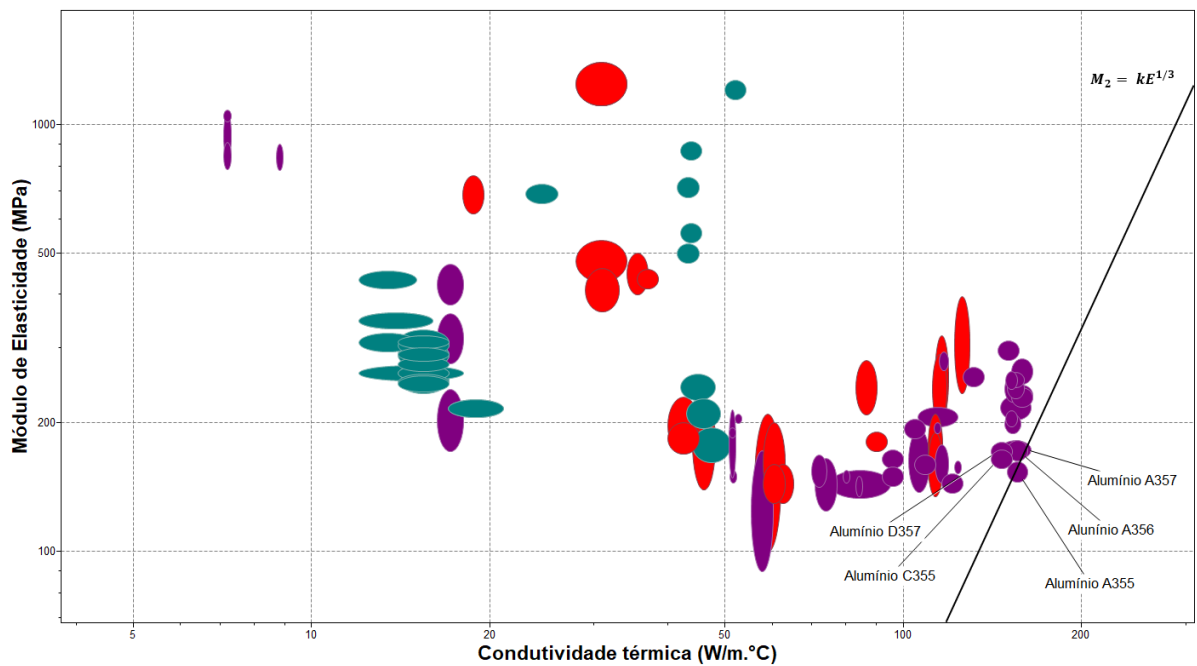


Figura 41 Diagrama de classificação para pinça de freio (maximizar transferência de calor)

6.5 CLASSIFICAÇÃO DOS MATERIAIS PARA O CAPÔ

Para o capô automotivo, foram definidos 2 índices de material. O primeiro índice ($M_1 = \epsilon$) tem por finalidade garantir a máxima ductilidade, já o segundo ($M_2 = \frac{E^{1/3}}{\rho}$), tem por objetivo minimizar a massa sem comprometer a rigidez necessária para a autossustentação. Aplicando os respectivos índices de materiais (conforme ilustrado nas figuras 42 e 43) sobre os materiais que foram considerados aptos pelo processo de triagem, foram selecionados os candidatos da tabela 16 e 17:

Tabela 16 - Materiais Selecionados para capô automotivo (maximizar ductilidade)

Materiais Selecionados
Liga de Bronze C60800
HASTELLOY C-276
Aço AISI 316LVM
Liga de Bronze C75700
HASTELLOY S

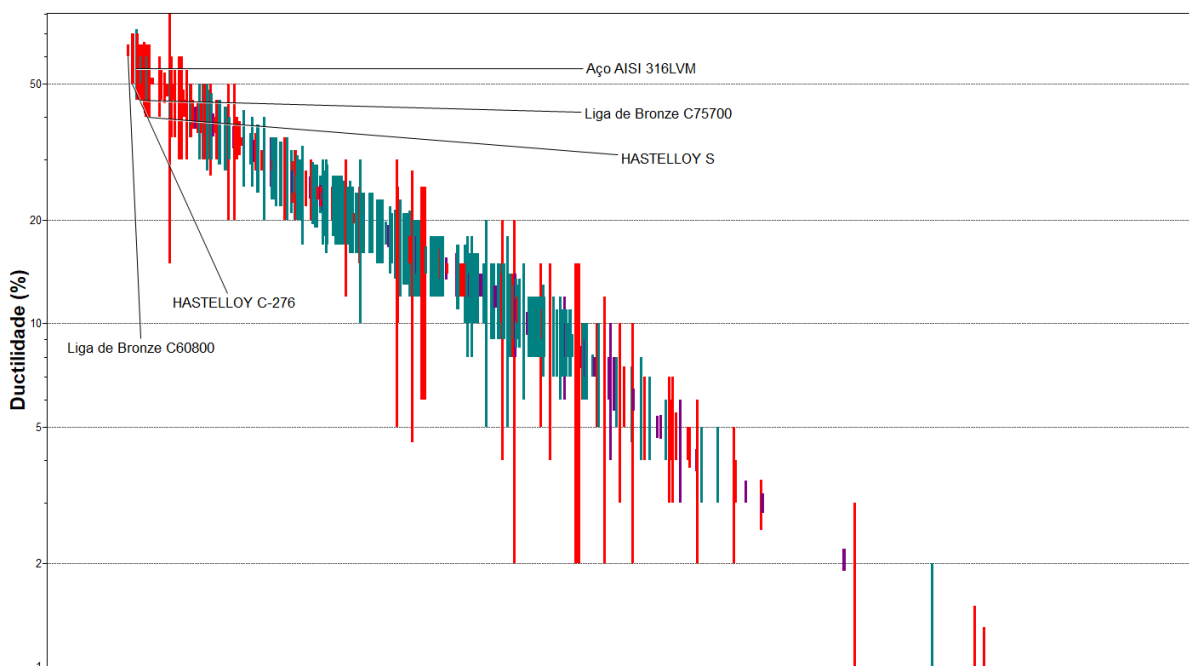


Figura 42 - Diagrama de classificação para capô automotivo (maximizar ductilidade)

Tabela 17 - Materiais Selecionados para capô automotivo (minimizar massa)

Materiais Selecionados
HASTELLOY W
HAYNES C263 (NIMONIC 263)
Aço YS450
Aço AISI 5160

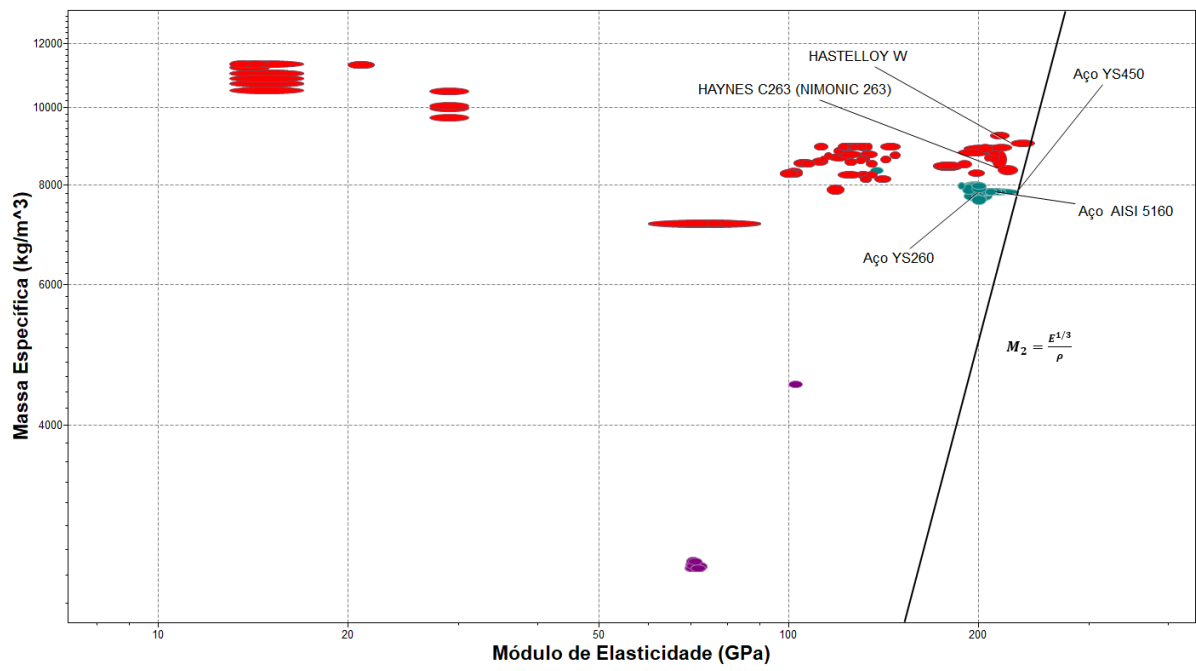


Figura 43 - Diagrama de classificação para capô automotivo (minimizar massa)

Após essa etapa, os materiais selecionados seguirão para etapa de documentação e escolha final.

7 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO FINAL

Nessa etapa é realizado um estudo de viabilidade, entre os materiais classificados, onde são levantados dados sobre: logística, disponibilidade, preço, atributos ecológicos, histórico de projetos com o respectivo material e etc. Para por fim, propor uma escolha final de material para cada peça.

7.1 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA A BIELA

Dentre os materiais listados na classificação pelo índice que considera falha por resistência a fadiga, a liga de titânio (Titânio, liga beta, Ti-15Mo-3Al-3Nb) parece ser o candidato mais promissor, haja vista que dentre os materiais classificados é o único que foi encontrado em catálogo de fabricantes nacionais que já a utilizam na sua linha de produtos. Como é o caso da fabricante SPA, que em sua linha de “bielas especiais” para veículos de alta performance utiliza ligas de titânio devido sua elevada resistência à fadiga e baixo peso específico, permitindo inclusive a realização de trabalhos de otimização topológica sobre a mesma, a figura 44 ilustra uma biela fabricada pela referida fabricante.



Figura 44 - Biela de Titânio (catálogo SPA)

Já dentre os materiais os materiais classificados segundo o critério de resistência a flambagem, o aço AISI 5140 pode ser considerado o melhor candidato pois possui diversos fornecedores em território nacional como: Gerdau, Arcelor Mittal, Gerdau, Açoporte e etc. Além de já ter sido empregado por algumas montadoras, como a Ford na linha *small-block 302*.

Com o intuito de propor uma seleção definitiva entre os dois materiais, assumiu-se como parâmetro o preço médio por unidade de volume apresentado pelo banco de dados *Granta-EduPack*, o resultado é apresentado na tabela 18.

Tabela 18 - Preço dos materiais finalistas para biela

Material	Preço por volume (BRL/m³)
Titânio, liga beta, Ti-15Mo-3Al-3Nb	4,94e5 ~ 5,83e5
Aço AISI 5140	2,29e4 ~ 2,4e4

Com base nos dados apresentados, percebe-se que o Aço AISI 5140 é o material ideal para o trabalho mencionado no tópico 5.1.1.

7.2 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA A MOLA

Dentre os materiais classificados, constata-se que todos possuem prévio histórico de utilização para produção de molas. No entanto, o aço Maraging 300 é mais comumente utilizado na indústria aeronáutica e possui custo substancialmente mais elevado, quando comparado com os outros materiais classificados.

Os demais materiais classificados possuem custo médio por unidade de volume praticamente iguais. Sendo assim, definiu-se que o material selecionado é o que apresentar menor produção de dióxido de carbono (CO_2) por unidade de massa durante o processo de trefilação. Os resultados são apresentados na tabela 19 e na figura 45.

Tabela 19 - Quantidade de CO_2 por quantidade de material para os materiais finalistas para a mola.

Material	Quantidade de CO_2 por quantidade de material (Kg/Kg)
Aço AISI 50B60	8,04 ~ 8,88
Aço AISI 5160	8,12 ~ 8,98
Aço AISI 5140	8,03 ~ 8,88
Aço AISI 9255	9,28 ~ 10,30

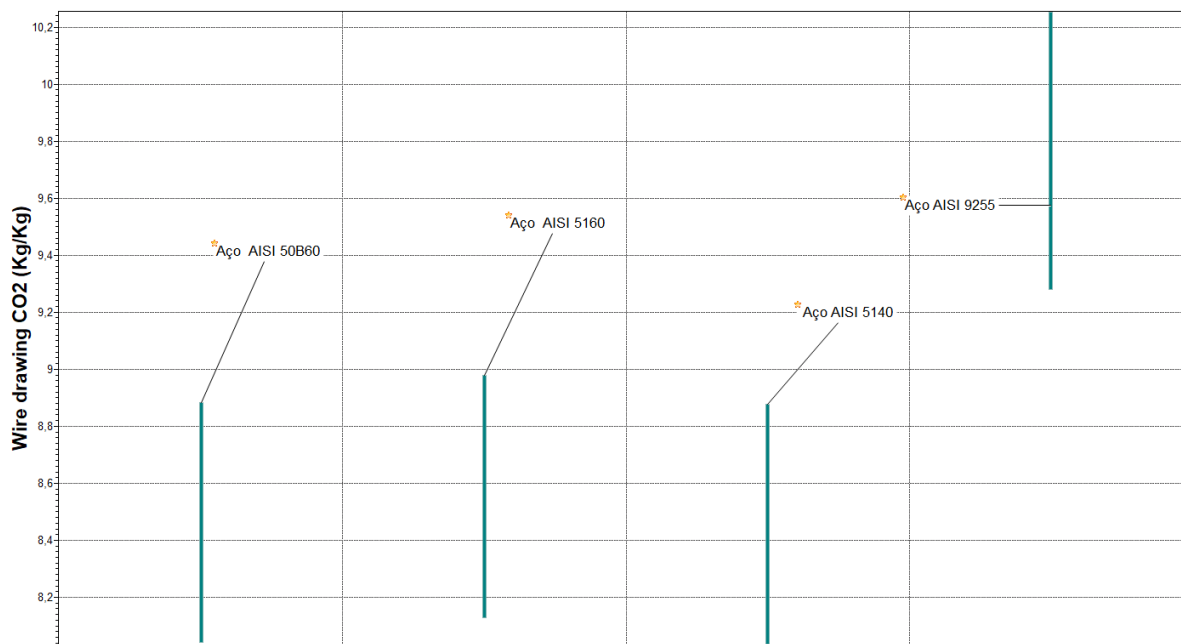


Figura 45 - Diagrama de Quantidade CO2 por quantidade de material (kg/kg) para os materiais finalistas da mola.

Tendo como referência os valores apresentados, define-se que o material que melhor se adequa ao que foi proposto no tópico 5.2.1 é o aço AISI 5140. Na ausência deste, também é viável a escolha do Aço AISI 50B60, pois possui uma produção de CO_2 praticamente igual ao primeiro material.

7.3 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA O VOLANTE DE MOTOR

Dentre os materiais que foram classificados, os únicos que apresentam histórico de projetos de volante de motor são o Aço AISI 4340 e o Aço AISI 50B60. Ambos materiais são encontrados por fornecedores no território nacional e possuem preço médio semelhante. Para selecionar o material mais adequado, definiu-se que o material selecionado é o que apresentar menor produção de dióxido de carbono (CO_2) por unidade de massa durante o processo de usinagem. Os resultados são apresentados na tabela 20 e na figura 46.

Tabela 20 - Quantidade de CO2 por quantidade de material para os materiais finalistas para o volante de motor.

Material	Quantidade de CO_2 por quantidade de material (Kg/Kg)
Aço AISI 4340	1,59 ~ 1,75
Aço AISI 50B60	1,64 ~ 1,81

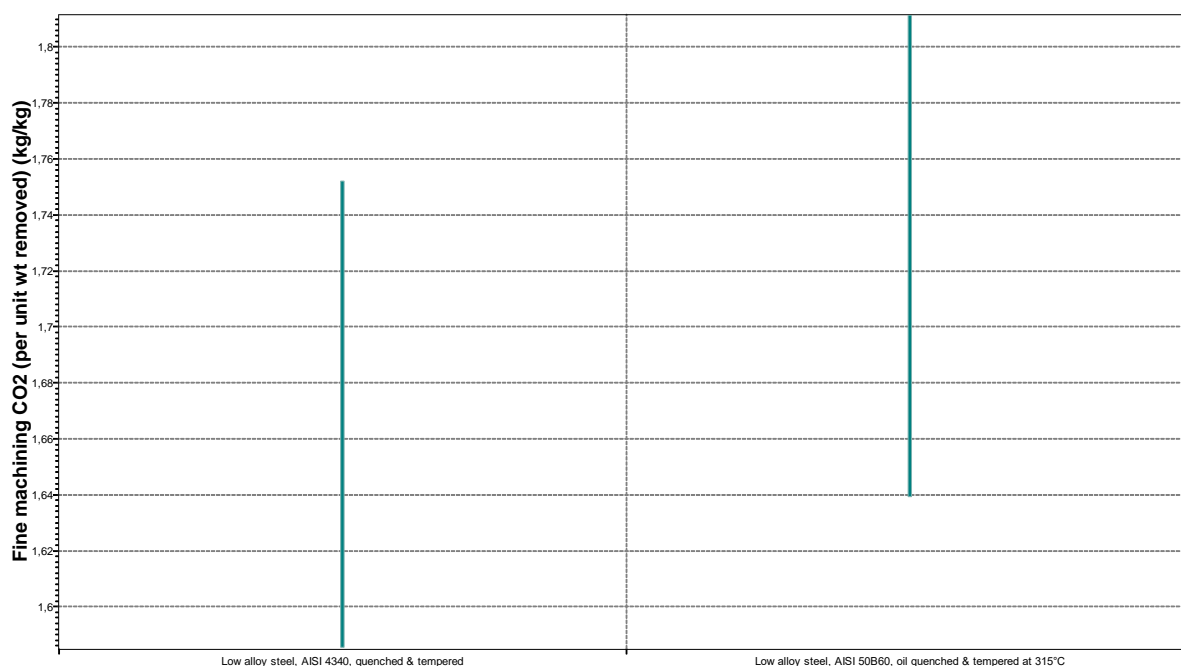


Figura 46 - Diagrama de Quantidade CO2 por quantidade de material (kg/kg) para os materiais finalistas do volante de motor.

Com base nos dados que foram apresentados, percebe-se que o aço 4340 é um material “menos danoso” ao meio ambiente, logo sendo a escolha mais viável para o projeto apresentado no tópico 5.3.1.

7.3 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA A PINÇA DE FREIO.

Como para a pinça de freio foram realizadas duas classificações (uma para cada índice de material), optou-se por realizar duas seleções tendo como critério o menor custo por unidade de volume para ambas (como ilustrado nas figuras 47 e 48). Ao final, tomou-se os melhores candidatos das duas seleções e foi escolhido o que apresentasse menor produção de CO_2 durante o processo de fundição. Os resultados são apresentados nas tabela 21, 22 :

Tabela 21 - Preço dos materiais finalistas para pinça de freio (minimizar massa).

Material	Preço por unidade de volume (BRL/m ³)
Aço SAE 4130	2,77e4 ~ 2,87e4
Aço ASTM CA-6NM	5,83e4 ~ 6,44e4
Aço ASTM CH-20	9,61e4 ~ 1,1e5
Superalloy MAR-M 302	2,17e6 ~ 2,86e6
Alloy M 220C	1,08e6 ~ 1,24e6

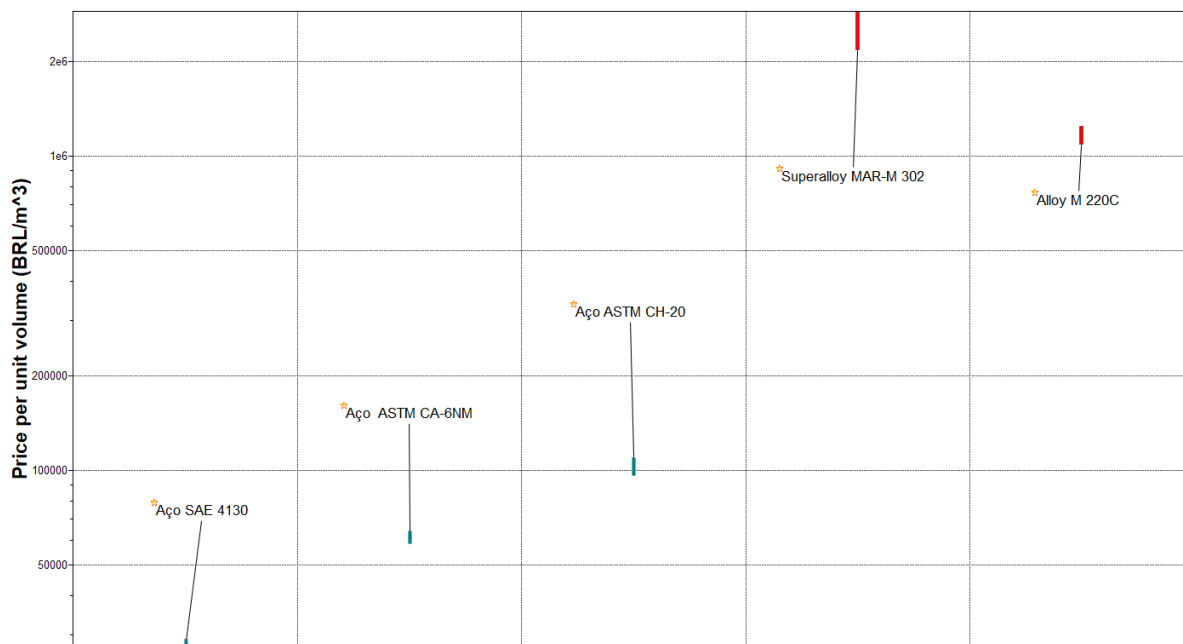


Figura 47 - Diagrama dos preços dos materiais finalistas para pinça de freio (minimizar massa).

Tabela 22 - Preço dos materiais finalistas para pinça de freio (maximizar transferência de calor).

Material	Preço por unidade de volume (BRL/m³)
Alumínio A357	2,34e4 ~ 2,77e4
Alumínio A356	2,29e4 ~ 2,68e4
Alumínio A355	2,28e4 ~ 2,68e4
Alumínio D357	2,29e4 ~ 2,68e4
Alumínio C355	2,29e4 ~ 2,68e4

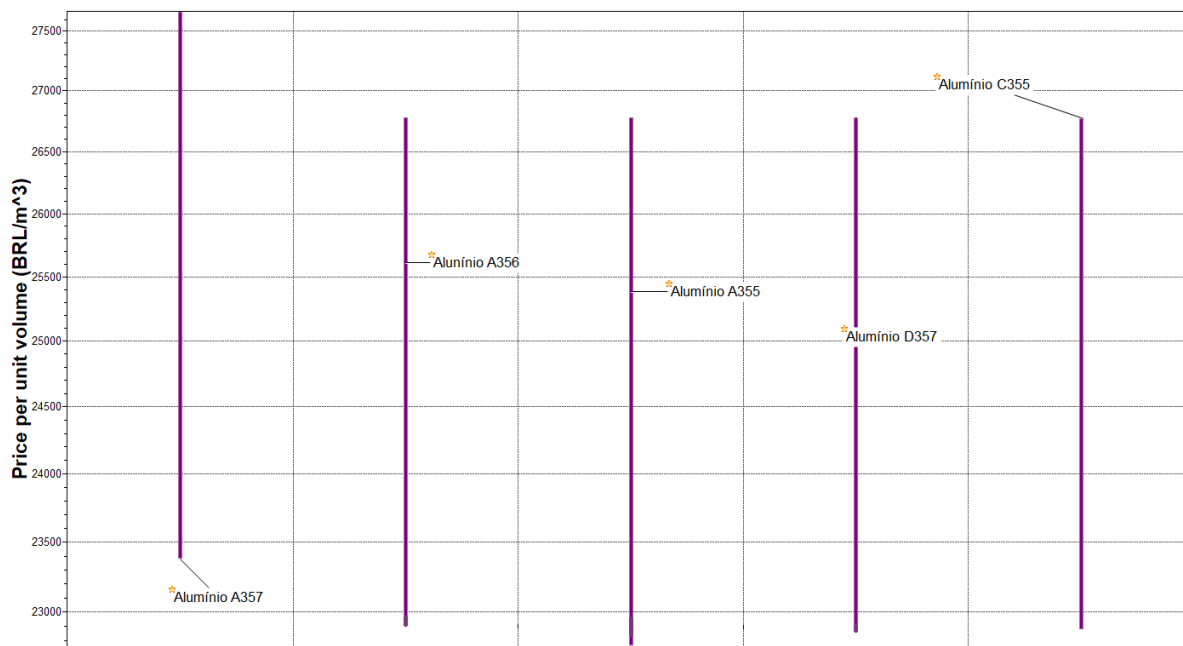


Figura 48 -Diagrama dos preços dos materiais finalistas para pinça de freio (maximizar transferência de calor).

Com isso, são selecionados os seguintes materiais: Aço SAE 4130 e Alumínio A355. Tomando estes finalistas e escolhendo o que apresentar menor produção de CO_2 durante o processo de fundição (como ilustrado na figura 49), têm-se o resultado na tabela 23:

Tabela 23 - Quantidade de CO_2 por quantidade de material para os materiais finalistas para a pinça de freio.

Material	Quantidade de CO_2 por quantidade de material (Kg/Kg)
Aço SAE 4130	0,65 ~ 0,719
Alumínio A355	0,65 ~ 0,719

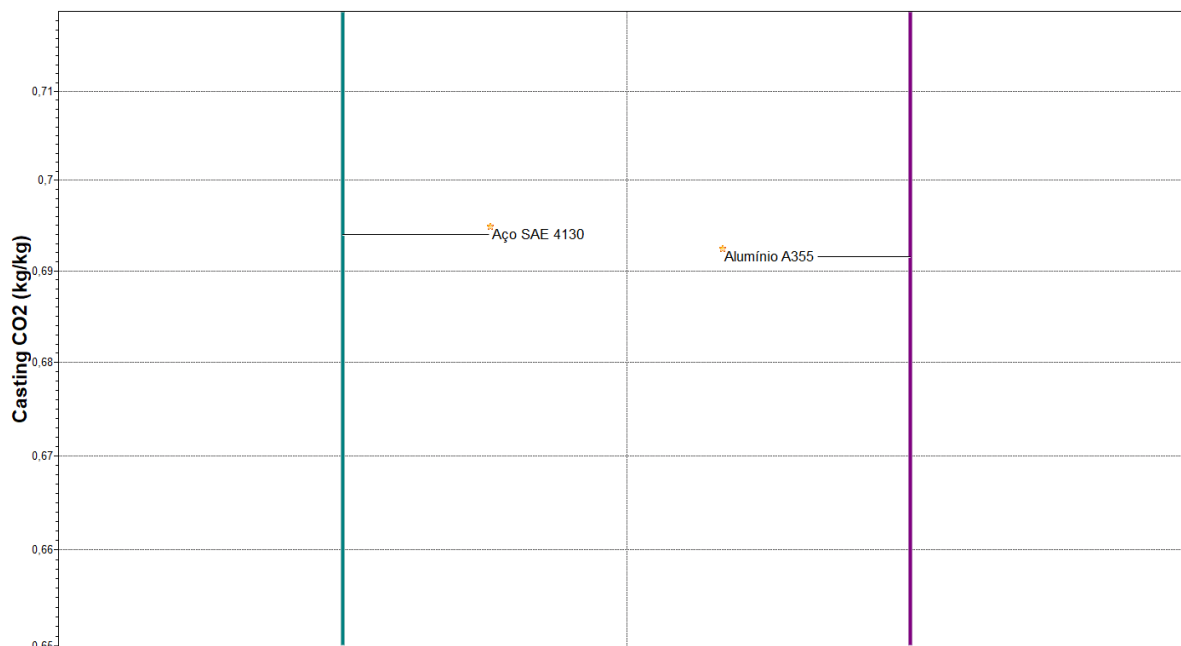


Figura 49 - Diagrama de Quantidade CO2 por quantidade de material (kg/kg) para os materiais finalistas da pinça de freio.

Com base nos dados fornecido pelo *Granta EduPack*, percebe-se que os valores de produção de CO_2 durante a fundição são os mesmos, o que acarreta em um empate. Com o intuito de selecionar um único material, optou-se pelo de menor custo (BRL/m³), no caso: Alumínio A355.

7.3 DOCUMENTAÇÃO E SELEÇÃO DO MATERIAL PARA O CAPÔ AUTOMOTIVO.

Para o capô automotivo foram realizadas duas classificações, então optou-se por realizar duas seleções tendo como critério o menor custo por unidade de volume para ambas (conforme ilustrado nas figuras 50 e 51). Ao final, tomou-se os melhores candidatos das duas seleções e foi escolhido o que apresentasse menor índice de *(pegada de carbono)/(massa reciclada)* durante o processo de estampagem. Os resultados são apresentados nas tabelas 24 e 25:

Tabela 24 - Preço dos materiais finalistas para capô automotivo (maximizar ductilidade)

Material	Preço por unidade de volume (BRL/m ³)
Aço AISI 316 LVL	2,34e4 ~ 2,53e5
Liga de Bronze C60800	1,80e5 ~ 2,21e5
Liga de Bronze C75700	1,95e5 ~ 2,38e5
HASTELLOY C-276	5,90e5 ~ 7,52e5
HASRELLOY S	6,25e5 ~ 7,91e5

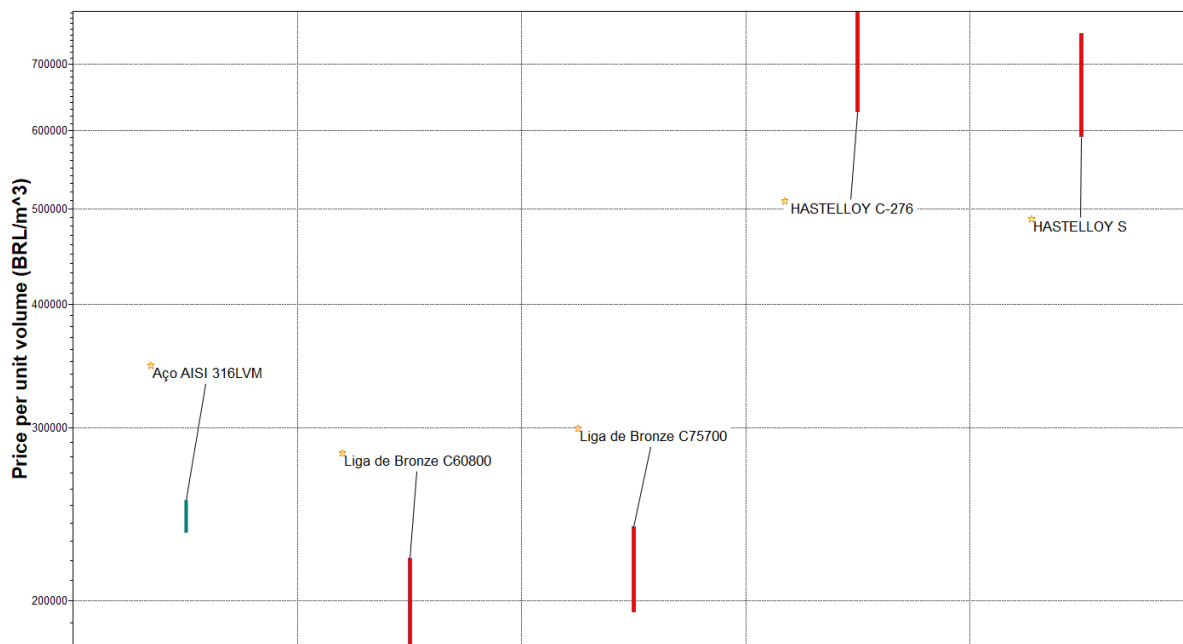


Figura 50 - Diagrama dos preços dos materiais finalistas para capô automotivo (maximizar ductilidade).

Tabela 25 - Preço dos materiais finalistas para capô automotivo (minimizar massa)

Material	Preço por unidade de volume (BRL/m³)
HAYNES C263 (NIMONIC 263)	8,72e5 ~ 1,13e6
HASTELLOY W	6,10e5 ~ 8,10e5
Aço AISI 5160	2,29e4 ~ 2,41e4
Aço YS450	3,90e4 ~ 4,13e4
Aço YS260	2,23e4 ~ 2,35e4

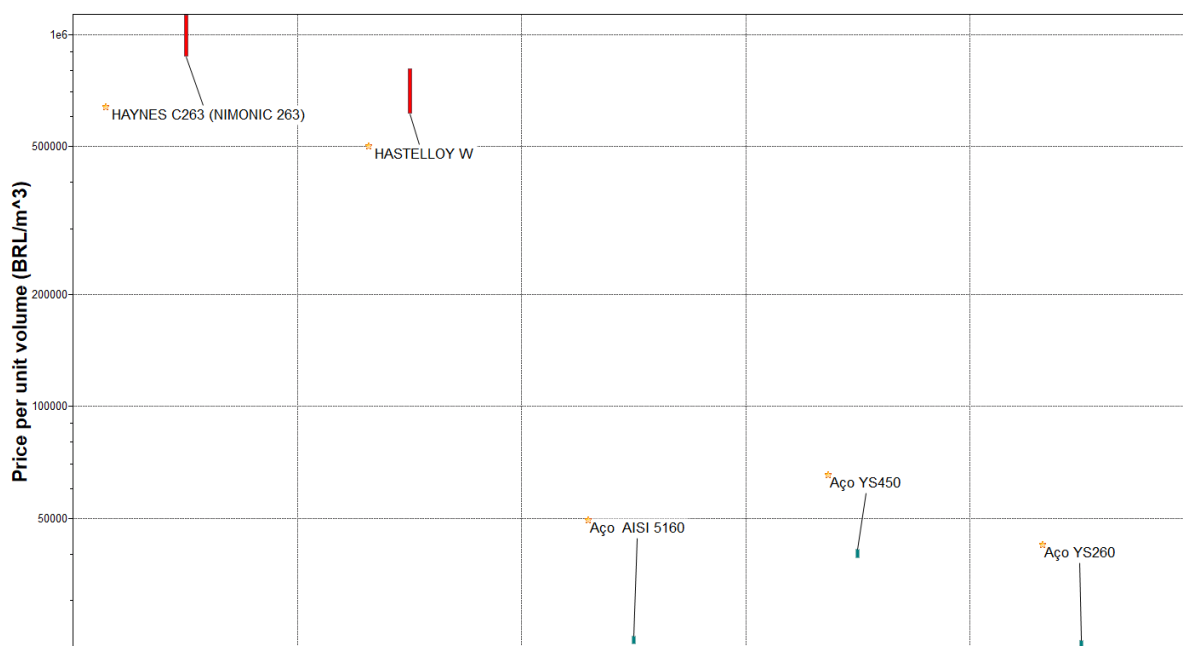


Figura 51 - Diagrama dos preços dos materiais finalistas para capô automotivo (minimizar massa).

Com isso, são selecionados os seguintes materiais: Liga de Bronze C60800 e Aço YS260. Tomando estes finalistas e escolhendo o que apresentar menor índice de (*pegada de carbono*)/(*massa reciclada*) (conforme ilustrado na figura 52), têm-se o resultado na tabela 26:

Tabela 26 - Índice de pegada de carbono por massa reciclada dos materiais finalistas para o capô automotivo

Material	$\frac{\text{pegada de carbono}}{\text{massa reciclada}}$ [kg/kg]
Aço YS260	0,521 ~0,576
Liga de Bronze C60800	1,09 ~1,21

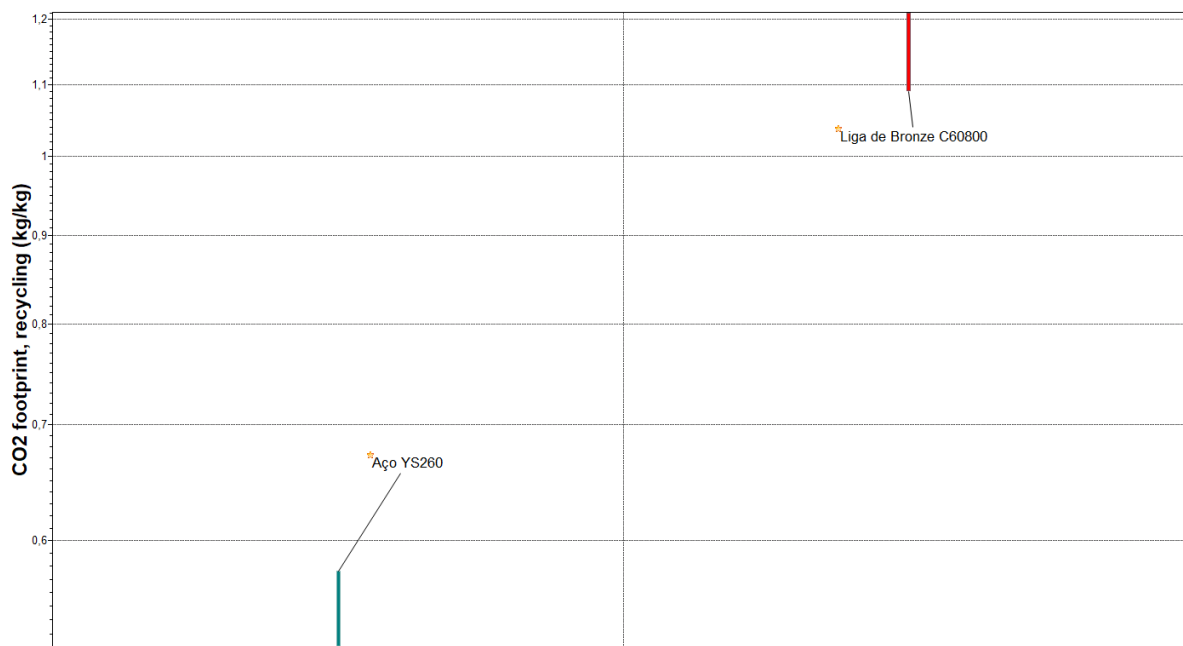


Figura 52 - pegada de carbono por massa reciclada dos materiais finalistas para o capô automotivo

Tomando os dados apresentados como referência, percebe-se que o aço YS260 é o material ecologicamente viável, sendo, portanto, a escolha para o capô automotivo.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem por intuito apresentar uma breve discussão sobre os materiais obtidos como retorno nas etapas de classificação e seleção final para cada um dos componentes automotivos. De maneira sumarizada os materiais selecionados para cada uma das peças encontra-se descrito na tabela 27.

Tabela 27 - Resultados da seleção de materiais para os componentes automotivos

Peça	Material selecionado
Biela	Aço AISI 5140
Mola de suspensão	Aço AISI 50B60
Volante de motor	Aço 4340
Pinça de freio	Alumínio A355
Capô automotivo	Aço YS260

8.1 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA A BIELA

Tomando com referência os materiais selecionados na etapa de classificação para este componente (tabela 10 e tabela 11), percebe-se que alguns destes, apesar de satisfazerem as restrições impostas, não são viáveis para a fabricação de uma biela. Por exemplo o Berílio S200 ou o MP35N, que apesar de atenderem aos critérios de resistência mecânica, não possuem muitos fornecedores em território nacional, além de possuir custo elevado.

De todos os materiais, a liga de titânio ($Ti-15Mo-3Al-3Nb$) e o aço AISI 5140 são os que apresentam ser mais promissores, pois apresentam vasta gama de fornecedores e já são (ou foram) empregados por algumas montadoras em sua linha de veículos, como a *Ford* que já empregou o AISI 5140 em sua linha de motores 302.

8.2 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA A MOLA DE SUSPENSÃO

Dentre os materiais descritos para a mola (tabela 12), quatro são aços da família AISI 5000, que em suma possuem cromo como principal elemento de liga. Segundo o próprio banco de dados do Granta Edupack é seu uso é bastante difuso, podendo ser empregado para fabricação de molas de suspensão.

Outro material classificado, o aço maraging 300, tem como principal característica ser um aço martensítico submetido a um tratamento de envelhecimento, o que lhe garante elevada resistência mecânica sem perda de ductilidade. Seu emprego mais recorrente é na indústria aeroespacial, e possui custo substancialmente elevado quando comparado com os demais materiais classificados (aços da família 5000), o que acaba por torna-lo uma escolha menos favorável.

8.3 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA O VOLANTE DE MOTOR

Todos os materiais selecionados para esse componente (tabela 13) possuem o histórico de já terem sido empregados na indústria automobilística. No entanto, no que diz respeito especificamente a volante de motores, somente o aço 4340 foi encontrado como um material utilizado para tal finalidade, essa informação pode ser atestada através de catálogos de peças da *Volkswagen* para o motor EA888.

8.4 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA A PINÇA DE FREIO.

Tomando como referência os materiais especificados na lista (14 e 15), percebe-se que apesar de serem considerados materiais aptos para a peça em questão, o Superalloy MAR- M 302 e o Alloy M 220C são materiais extremamente caros e com poucos fornecedores, sendo de uso mais recorrente no segmento aeroespacial. Já as ligas de alumínio citadas na tabela 15 atendem bem os requisitos de projeto, apesar de possuírem resistência mecânica relativamente inferior quando comparadas com as ligas de aço propostas na tabela 14. Ligas de alumínio possuem histórico de já serem utilizadas como materiais para fabricação de pinça de freio, principalmente para veículos com baixa relação $\frac{\text{peso}}{\text{potência}}$.

8.3 DISCUSSÃO SOBRE MATERIAIS CLASSIFICADOS PARA O CAPÔ AUTOMOTIVO

Dentre os materiais classificados para este componente, percebe-se que apesar de serem considerados aptos para o componente (tendo as restrições de projeto como único parâmetro), na prática, têm-se alguns destes materiais como soluções impraticáveis. As ligas de bronze são um exemplo disso, pois são caras, demasiadamente dúcteis e condutividade térmica muito elevada, desta maneira não sendo uma solução interessante.

As ligas de aço parecem ser os materiais mais viáveis para a presente aplicação, por atenderem os requisitos mecânicos impostos, serem financeiramente viáveis e possuírem o histórico de serem o tipo imaterial mais empregado em tal contexto.

9 CONCLUSÃO

O presente projeto de graduação contempla um processo de seleção de materiais para alguns componentes de diferentes subsistemas de um veículo automotivo, sendo esta seleção guiada pela Metodologia Ashby. O trabalho inicia com uma revisão bibliográfica da metodologia proposta por Michael Ashby, seguindo para uma seleção dos componentes automotivos que foram utilizados para estudo de caso. Após isso, foram definidos os requisitos de projeto e índices de materiais para cada componente. Em seguida, foi realizada uma busca na literatura de projetos de peças que fornecessem dados para embasar as posteriores etapas da metodologia de seleção de materiais. Consequente, foram aplicadas as etapas de triagem, classificação, documentação para cada um dos componentes estudados através do software *GrantaEduPack*. Na etapa seguinte foi selecionado um material para cada componente. E por fim, é apresentada uma discussão sobre os resultados obtidos.

O trabalho logrou êxito ao exemplificar a versatilidade que a metodologia apresenta, podendo ser aplicada nos mais diversos contextos acadêmicos e industriais com auxílio dos softwares desenvolvidos pela Granta, que se mostraram extremamente ricos quanto a critérios de seleção, informações sobre materiais e processos de fabricação.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agarwal, R., Yadav, K., & Singh Khurana, R. (02 de Abril de 2019). *Design Optimization of Front Hood Structure for Meeting Pedestrian Headform Protection in an Existing Vehicle*. SAE Technical Paper.
- Ashby, M. (1992). *Materials Selection in Mechanical Design*. Oxford: Pergamon Press.
- Ashby, M. (2012). *Seleção de Materiais no Projeto Mecânico*. Elsevier Editora Ltda.
- ASM International: *Handbooks*. (7 de Setembro de 2020). Fonte: ASM International: <https://www.asminternational.org/handbooks>
- Basshuysen, R. V., & Schäfer, F. (2004). *Internal Combustion Engine Handbook*. SAE International.
- BOSCH. (2004). *Manual de Tecnologia Automotiva*. Edgar Blucher.
- Budynas, R. G. (2016). *Elementos de máquinas de Shigley*. AMGH Editora Ltda.
- Callister, W. D. (2002). *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. LTC Editora.
- Chiaverini, V. (1986). *Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento*. McGraw-Hill.
- Cross, N. (2000). *Engineering Design Methods*. Wiley.
- de Lima e Silva, R. (2013). *Projeto Mecânico de Biela Automotiva Baseado em Otimização Estrutural*. USP
- Dieter, G. E. (1999). *Engineering design, a materials and processing approach*. McGraw-Hill.
- Etchepare, H., & Kindlein Jr., W. (2002).
- Ferrante, M. (2013). *Seleção de Materiais*. EdUFSCaR.
- Furuhama, S. (1966). *Temperature Measurements of the Connecting Rod, Piston Pin and Crankpin Bearing of an Automobile Gasoline Engine*.
- GRANTA EduPack. (9 de Setembro de 2020). Fonte: GRANTA Design: <https://www.grantadesign.com/education/ces-edupack/what-is-edupack/>
- Implementação de uma Materioteca no Estado do Rio Grande do Sul. *Revista Tecnológica e Tendências*, 65-71.
- Juvinall, R. C. (2008). *Fundamentos do Projeto de Componentes de Máquinas*. LTC.
- Limpert, R. (2011). *Brake Design and Safety*. SAE International.
- Martins, J. (2003). *Motores de Combustão Interna*. Publindústria.
- MatWeb Property Data: About us. (9 de Setembro de 2020). Fonte: MatWeb Property Data: <http://www.matweb.com/services/services.aspx>
- Nelson, J., & Seyman, A. (02 de Abril de 2019). *Aerodynamically Induced Loads on Hood Latch and Rood Retention Systems*. SAE Technical Paper.
- Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1997). *Criação de Conhecimento na Empresa*. Campus.

- Norton, R. L. (2010). *Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos*. Mc Graw Hill.
- Norton, R. L. (2010). *Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos*. Mc Graw Hill.
- Norton, R. L. (2013). *Projeto de Máquinas: uma abordagem integrada*. Bookman.
- Pahl, G., & Beitz, W. (1997). *Engineering design*.
- Pereira, L. D. (2011). *Análise da metodologia de levantamento experimental para obtenção dos parâmetros da suspensão de um veículo automotor*.
- RODRIGUES, J. P. (Setembro de 2011). *Projecto de um Motor de Combustão Interna para um Veículo Automóvel de Extra-Baixo Consumo de Combustível*. Coimbra, Portugal.
- RUTHES, J. P. (2016). *Análise de sensibilidade de suspensão veicular*.
- Scheleski, S. (2015). *Seleção de Materiais no Projeto de Máquinas e Implementos Agrícolas*. UFRGS
- Trocado, W.M. (2017). *Dimensionamento de Pinças de Freio a Disco para Veículo Mini Baja SAE Utilizando Alumínio Reciclado*.
- Weller, L.K. (2018). *Sistemas de Transmissão com Embreagem Convencional e Dupla: Um Comparativo Técnico*.
- Yamada, Y. (2007). *Materials for Springs*. Springer.

10.1 ANEXO A

Tabela 28 - Principais características do motor e outros componentes (RODRIGUES, 2011)

MOTOR	M3165
Curso do êmbolo, L , [mm]	26.25
Diâmetro do pistão, B , [mm]	33.00
Cilindrada, V_d , [cm ³]	22.45
Relação de compressão, r_c , adimensional	15.50
Comprimento da biela, l , [mm]	58.00
Relação L/B , adimensional	0.80
Volume mínimo da câmara de combustão, V_c , [mm ³]	1475.3
Número de cilindros, n_c , adimensional	1
Raio da manivela, a , [mm]	13.13
Relação l/a , adimensional	4.42
VÁLVULA DE ADMISSÃO	
Ângulo de abertura da válvula de admissão, BTDC, IVO, [grau]	10
Ângulo de fecho da válvula de admissão, ABDC, IVC, [grau]	15
Diâmetro da válvula de admissão, DVI, [mm]	12.32
Largura da sede da válvula de admissão, WI, [mm]	0.831
Ângulo da sede da válvula de admissão, $\square I$, [grau]	45
Levantamento da válvula de admissão, LVI, [mm]	3.35
Diâmetro da haste da válvula de admissão, DSI, [mm]	3.475
Número de válvulas de admissão, n_{VI} , adimensional	1
VÁLVULA DE ESCAPE	
Ângulo de abertura da válvula de escape, BBDC, EVO, [grau]	35
Ângulo de fecho da válvula de escape, ATDC, EVC, [grau]	0
Diâmetro da válvula de escape, DVE, [mm]	12.14
Largura da sede da válvula de escape, WE, [mm]	0.648
Ângulo da sede da válvula de escape, $\square E$, [grau]	45
Levantamento da válvula de escape, LVE, [mm]	2.950
Diâmetro da haste da válvula de escape, DSE, [mm]	3.440
Número de válvulas de escape, n_{VE} , adimensional	1
VELA DE IGNIÇÃO	
Número de velas de ignição, n_{sp} , adimensional	2
INJECTOR	
	BOSCH EV6